FECHA	26-06-08

NÚMERO RA	
PROGRAMA	Ingeniería De Sonido

AUTOR (ES)	CABRERA Ortiz, Juan Gabriel
TÍTULO	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANEL DE DIFUSIÓN NUMÉRICO, BIDIMENSIONAL

PALABRAS CLAVES	Difusor, difusores, QRD, Difusión.

DESCRIPCIÓN	Diseño, construcción y medición de un difusor bidimensional de ancho de banda extendido (500Hz-16kHZ)

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	• The QRD DI*F*FRACTAL: A New 1 or 2-Dimensional Fractal Sound Diffusor Dr. Peter D'Antoni*o.* • The Reflection Phase Grating Diffusor: Design Theory and Application. PETER D'ANTONIO AND JOHN H. KONNERT.

NÚMERO RA	
PROGRAMA	Ingeniería de Sonido

CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN,
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
1.1 ANTECEDENTES
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA
1.3 JUSTIFICACIÓN
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN
1.4.1 Objetivo General
1.4.2 Objetivos específicos
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES
2. MARCO DE REFERENCIA
2.1 MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL
2.1.1 Difusión.
2.1.2 Difusión Acústica.
2.1.3 Difusores de sonido basados en residuos cuadráticos.
2.1.4 Fractales.
2.1.5 Difusores de sonido basados en residuos cuadráticos fractales.

2.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO
3. METODOLOGÍA
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN
3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA USB/SUBLÍNEA DE FACULTAD/CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA
3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN
3.3.1 Estudio
3.3.2 Calculo
3.3.3 Diseño
3.3.4 Construcción
3.3.5Medición
3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA
3.4 HIPÓTESIS
3.5 VARIABLES
3.5.1Variables Independientes
3.5.2Variables Dependientes
4. DESARROLLO INGENIERIL
4.1 Diseño
4.2 Construcción
4.3 Medición
5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS
5.1 Diagramas polares de difusión.
5.1.1 Dimensión 1.
5.1.2 Dimensión 2.
5.1.3 Superficie Plana
5.2 Coeficientes de Difusión
5.2.1 Coeficientes de difusión direccionales.
5.3 Reflectogramas

6. CONCLUSIONES
7. RECOMENDACIONES.

NÚMERO RA	
PROGRAMA	Ingeniería de Sonido

METODOLOGÍA

1. El enfoque de la investigación: Empírico - analítico
   Línea de investigación del programa: Tecnologías actuales y sociedad
   Sublínea de la Facultad de Ingeniería: Instrumentación y control de procesos
   Campo temático del programa: Acústica

2. técnicas de recolección empleadas

   Estudio
   Diseño
   Construcción
   Medición

3. Hipótesis

Se puede diseñar y construir un difusor numérico de cuatro bandas de octava, especificado y de un funcionamiento optimizado en un panel cuadrado aplicando y unificando varios tipos de difusores siguiendo sus métodos de cálculo y tomando en cuenta sus características particulares.

4. Variables
   Variables independientes.

- Tipos de difusores que se apliquen.
- Material o materiales sobre el cual se elabora el panel de difusión.

Variables dependientes

- Mano de obra calificada que se encarga de la construcción del difusor.
- Dimensiones del panel.
- El instrumento de medición y las condiciones de medición con el cual se realice la medición de las características del difusor.

CONCLUSIONES	

- Usando el concepto matemático de los fractales, la implementación de los difráctales y sus secuencias generadora. Se pueden diseñar unidades optimizadas de Difusión (paneles) bidimensionales que tengan un ancho de banda extendido, y puedan ser aplicados en cualquier recinto como unidades comerciales.

- El panel de difusión BD-0516, funciona como una superficie difusora de 500Hz a 16KHz y puede ser aplicado en cualquier recinto donde se necesite generar reflexiones difusas buscando mejorar la imagen sonora, inteligibilidad, crear un campo homogéneo y reducir distorsión acústica.

- Se hace necesario buscar una forma de fabricación, más práctica que la empleada en la construcción del BD – 0516 ya que la forma artesanal como fue construido se torna muy tediosa y muy demorada lo que limita la producción en masa de dicho panel.

- La programación de libros electrónicos en Exel facilitan enormemente la correlación de datos en la caracterización del patrón polar y coeficiente de difusión de un difusor.

- El material escogido, poliestireno expandido de alta densidad, demostró ser un material muy versátil tanto en manejabilidad para su corte, como en sus características físicas como absorcion, densidad y fungibilidad.

- El panel fabricado se comporta como una superficie difusora ya que en ninguna dimensión e incidencia de fuente se encontró un coeficiente de difusión menor a 0.5.

- A incidencia aleatoria el coeficiente de difusión se ve afectado por la reflexión especular que hay en el ángulo contrario de incidencia de la fuente lo que permite afirmar que el difusor actúa al 100 por ciento a incidencia normal de fuente mas sin embargo nunca deja de comportarse como superficie difusora.

- Se comprobó que a frecuencias más bajas es mayor la difusión, hasta en una superficie plana.

- La dimensión 1 del panel es la más optima para ser aplicada paralelamente a los receptores (oídos, micrófonos) ya que es la que presenta patrones polares mas uniformes en las diferentes bandas y por ende tiene un coeficiente de difusión más elevado.

- Los diagramas polares en bandas de frecuencias altas son menos uniforme por lo tanto el coeficiente de difusión del panel se ve afectado en frecuencias altas.

- El coeficiente de difusión de una superficie plana del mismo material y mismas dimensiones es mucho menor que el de cualquier dimensión del panel, probando asi que la teoría y el diseño de las cavidades y dimensiones del difusor sirve para re direccionar la energía.

- El difusor no presenta problemas de corte en frecuencias de diseño, mantiene el campo difuso en el rango útil para el cual fue diseñado.

- Los diagramas polares de dispersión son dependientes de uniformidad según

la escala que se utilice en ellos. convirtiéndose en un manejo de escala presentar diagramas uniformes o no, impidiendo evaluar el verdadero comportamiento de un difusor, para esta medición se procuro manejar la misma escala en las diferentes graficas.

- El concepto de los difráctales si permite diseñar un difusores de un ancho de banda extendido.

- Como se observo en el reflectograma es claro que el difusor entrega mas reflexiones que una superficie plana.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PANEL DE DIFUSION NUMERICO, BIDIMENSIONAL.

JUAN GABRIEL CABRERA ORTIZ.

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA.

FACULTAD DE INGENIERIA.

INGENIERIA DE SONIDO.

BOGOTA.

2008.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PANEL DE DIFUSION NUMERICO, BIDIMENSIONAL.

JUAN GABRIEL CABRERA ORTIZ.

Trabajo de grado como requisito para optar el titulo de ingeniero de sonido.

Tutores.

Luis Jorge Herrera, tutor de forma.

Luis Fernando Hermida, tutor de fondo.

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA.

FACULTAD DE INGENIERIA.

INGENIERIA DE SONIDO.

BOGOTA.

2008.

AGRADECIMIENTOS.

Existen algunas personas que colaboraron firmemente para que este proyecto hoy sea una realidad, esas personas son:

Físico. Luis Jorge Herrera. Con sus amplios conocimientos me colaboró siempre para pulir día a día la forma y el fondo de este proyecto.

Ing. Luis Fernando Hermida. Me guio y dio las pautas necesarias para poder desarrollar el proyecto.

Sr. Pedro Valleta. Quien me demostró que el conocimiento está al servicio del que quiere y puede y me brindo gran parte de la información necesaria en el desarrollo de mi proyecto de grado.

A esas tres personas, infinitas gracias.

“Dedico este proyecto de grado a tres personas quienes fueron el medio durante 5 años por el cual dios me dio la oportunidad de estudiar una carrera profesional, esas personas son: Mi amada madre Imelda Ortiz Vela, Mí amado padre Humberto Marino Cabrera y mi amado Hermano Mario David Cabrera”.

NOTA DE ACEPTACION

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

CONTENIDO.

Pág.

INTRODUCCION 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES 5
1.2 DESCRIPCION Y FORMULACION DEL PROBLEMA 7
1.3 JUSTIFICACION 8
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION
1.4.1 Objetivo General 9
1.4.2 Objetivos específicos 9
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES 10

2. MARCO DE REFERENCIA
2.1 MARCO TEORICO – CONCEPTUAL 11
2.1.1 Difusión. 11
2.1.2 Difusión Acústica. 12
2.1.3 Difusores de sonido basados en residuos cuadráticos. 18
2.1.4 Fractales. 20
2.1.5 Difusores de sonido basados en residuos cuadráticos fractales. 23

2.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO 25

3. METODOLOGIA
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACION 26
3.2 LINEA DE INVESTIGACION DE LA USB/SUBLINEA DE FACULTAD/CAMPO TEMATICO DEL PROGRAMA 26
3.3 TECNICAS DE RECOLECCION DE LA INFORMACION 27
3.1.1 Estudio 27
3.1.2 Calculo 27
3.1.3 Diseño 28
3.1.4 Construcción 28
3.1.5 Medición 29
3.4 POBLACION Y MUESTRA 29
3.5 HIPOTESIS 30

3.6 VARIABLES 30
3.6.1 Variables Independientes 30
3.6.2 Variables Dependientes 30

4. DESARROLLO INGENIERIL
4.1 Diseño 31
4.2 Construcción 41
4.3 Medición 47

5. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS 51

5.1 Diagramas polares de difusión. 51
5.1.1 Dimensión 1. 52
5.1.2 Dimensión 2. 55
5.1.3 Superficie Plana 58
5.2 Coeficientes de Difusión 60
5.2.1 Coeficientes de difusión direccionales. 60
5.3 Reflectogramas 62

6. CONCLUSIONES 63

7. RECOMENDACIONES. 66

BIBLIOGRAFIA 67

GLOSARIO 68

LISTA DE FIGURAS.

Pág.

Figura 1. Esquema direccional de un difusor. 11

Figura 2. Esquema del cálculo de la amplitud de la dispersión. 13

Figura 3. Patrón polar normal vs. Difuso. 15

Figura 4. Representación del coeficiente de difusión. 16

Figura 5. Difusor de sonido basado en residuos cuadráticos. 19

Figura 6. Respuesta polar de difusor QRD. 20

Figura 7. Ejemplo de difusor difractal. 32

Figura 8. Secuencia de Residuos Cuadráticos. 33

Figura 9. Secuencia obtenida para difusor bidimensional. 37

Figura 10. Matriz Con factor de Profundidad Para difusor Bidimensional Fractal, 750Hz – 4280. -38

Figura.11. Plano de Corte, Fractales 38

Figura. 12, Plano de corte Fractal Qrd 4k-25k. 40

Figura 13, Difusor Fractal Qrd 4k-25k en 3 dimensiones 40

Figura.14. Esquema De aplicación de Fractal Qrd De una dimensión para cubrir 2 dimensiones.- 41

Figura 15. Esquema Difractal De orden 13-5. 41

Figura 16. Esquema de cortador de poliestireno. 43

Figura 17. Esquema de medición difusor BD-0516 49

Figura 18. Medición de ruido de Fondo en el lugar y hora de Medición. 50

Figura 19. Reflectograma obtenido para superficie plana en 70 grados. 62

Figura 20. Reflectograma obtenido para superficie difusor en dimensión 1 en 70 grados. 60

LISTA DE IMÁGENES.

Pág.

Imágen 1. Laminas de poliestireno expandido de alta densidad 42

Imagen No 2. Cortador de poliestireno. 43

Imagen No 3. Ejemplo de corte de Fractales de Poliestireno 44

Imagen No 4. Fractales bidimensionales 44

Imagen No 5. Tiras de poliestireno de 4 X 4 Cm. 45

Imagen No 6. Construcción del difusor Fractal 1. 45

Imagen No 7. Construcción del difusor Fractal 1. 46

Imagen No 8. Tiras cortadas y pegadas entre sí para difusor 2. 46

Imagen No 9. Construcción del difractal. 47

Imagen No 10. Construcción del difractal. 47

Imagen No 11. Difusor BD-0516. 47

Imagen No 12. Medición de dimensión 1, en el punto de 20 grados fuente a 0 grados. 50

Imagen No 13. Fuente a 5m en incidencia aleatoria. 51

Imagen No 14. Medición patrón polar y coeficiente de difusión BD – 0516 51

Imagen No 15. Superficie plana de referencia, mismo material, mismas dimensiones. 51

LISTA DE GRAFICOS.

Pág.

Grafica 1. Diagrama Polar de Difusión para 250, 500, 630 y 800Hz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal. 52

Grafica 2. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal. 52

Grafica 3. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal. 53

Grafica 4. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal. 53

Grafica 5. Diagrama Polar de Difusión 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y 16kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal. 53

Grafica 6. Diagrama Polar de Difusión para 250Hz, 500Hz, 630Hz y 800Hz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria. 54

Grafica 7. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria. 54

Grafica 8. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria 54

Grafica 9. Diagrama Polar de Difusión para 4kHz, 5kHz y 6.3kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria. 54

Grafica 10. Diagrama Polar de Difusión para 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y 16kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria. 55

Grafica 11. Diagrama Polar de Difusión para 250Hz, 500Hz, 630Hz y 800Hz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal. 55

Grafica 12. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal. 55

Grafica 13. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal. 56

Grafica 14. Diagrama Polar de Difusión para 4kHz, 5kHz y 6.3kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal. 56

Grafica 15. Diagrama Polar de Difusión para 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y 16kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal. 56

Grafica 16. Diagrama Polar de Difusión para 250Hz, 500Hz, 630Hz y 800Hz en la dimensión 2 del panel a incidencia aleatoria. 57

Grafica 17. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia aleatoria. 57

Grafica 18. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria. 57

Grafica 19. Diagrama Polar de Difusión para 4kHz, 5kHz y 6.3kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria. 57

Grafica 20. Diagrama Polar de Difusión para 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y 16kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria. 58

Grafica 21. Diagrama Polar de Difusión para 250, 500, 630 y 800Hz superficie plana a incidencia normal. 58

Grafica 22. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz superficie plana a incidencia normal. 58

Grafica 23. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz superficie plana a incidencia normal. 59

Grafica 24. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz superficie plana a incidencia normal. 59

Grafica 25. Diagrama Polar de Difusión 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y superficie plana. 59

Grafica 14. Coeficientes de difusión en 1/3 de octava para las dos dimensiones del panel y superficie plana. 61

LISTA DE TABLAS.

Tabla No. 1. Relación de frecuencia, longitud de onda y orden de difusión 33

Tabla No.2. Longitud de onda para 750Hz. 33

Tabla No. 3. Relación de Fractales en dimensiones y Cantidad. 35

Tabla No.4 Secuencia obtenida para difusor Qrd fractal de 4k a25k. 37

Tabla No. 5. Dimensión De los fractales 2 según su secuencia 38

Tabla 6 No. Numero de fractales necesarios para difusor 2. 39

Tabla No 7. Coeficientes de difusión direccional para las dos dimensiones. 60

LISTA DE ANEXOS.

	Pág.
ANEXO A	70
ANEXO B	80
ANEXO C	85

INTRODUCCIÓN.

No es de obviar la importancia del uso de los difusores como una solución acústica en recintos, a partir de la década del '80 aproximadamente se comienza a estudiar el fenómeno de la difusión científicamente con nuevas herramientas de medición. Es así como se descubre su gran eficiencia en el control de reflexiones fuertes y paulatinamente se comienza a definir un coeficiente de difusión direccional extraído del patrón polar de las llamadas "reflexiones difusas" o "salientes" de la superficie del difusor.

"Es común encontrar materiales que reflejen o que absorban el sonido, pero es difícil adquirir aquellos que dispersan el sonido debido que las unidades comerciales en existencia son muy pocas."[1]

Esta "nueva" herramienta para los Ingenieros de sonido es por excelencia la más importante (en aquellos casos en que se requiere complementar o embellecer la fuente sonora, como son las Salas de Concierto, Home Theaters, Salas de Ensayo, Estudios de Grabación, Estudios de Radio y TV, Cines, Auditorios, Salas de Reunión, Aulas para educación, Iglesias, etc.), pues redistribuye la energía acústica homogéneamente dentro del recinto, incrementa la inteligibilidad de la palabra, enriquece al máximo el material sonoro, minimiza la distorsión acústica que pueden introducir los recintos sobre el sonido, etc.

En Colombia no es mucho lo que se ha investigado acerca de difusión y tampoco son muchas las empresas que se dediquen a fabricar e implementar paneles de difusión en recintos, siendo muy novedoso el diseñar y construir un panel de difusión que contenga varios difusores numéricos dentro de este y que tenga características optimizadas, como su ancho de banda su coeficiente de difusión y patrón polar, un panel que pueda ser aplicado en cualquier recinto donde sea necesario el campo

[1] Difusores acústicos 1, Ingeniería de sonido. 2003.

difuso. Es por eso que al elaborar este proyecto de grado no solo se pretende elaborar un difusor convencional, sino elaborar un panel de difusión sonoro, que este optimizado para poder ser implementado en cualquier recinto donde el sonido requiera especial tratamiento y no un difusor convencional para alguna frecuencia especifica y para un recinto especifico, ofreciendo así una herramienta acústica multifuncional para los recintos donde el sonido tenga prelación.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1 ANTECEDENTES

"La teoría más influyente sobre la difusión acústica es la del investigador alemán Manfred R. Schroeder. Esta teoría permite diseñar estructuras altamente difusoras del sonido en un intervalo de frecuencias, y su eficacia se acostumbra a medir y representar por diagramas polares"[2]. Schoeder fue el primero en deducir los métodos de cálculo de los difusores numéricos (PRD, QRD) y en establecer el fundamento teórico de la difusión.

Después de los difusores numéricos de Schoeder se desprenden un sin número de estudios realizados sobre difusores, caracterización de patrones polares y coeficientes de difusión. Deduciendo secuencias bidimensionales y otro tipo de difusores, en la actualidad existen en algunas empresas dedicadas al diseño construcción de difusores acústicos. Es el caso de R.P.G. Diffusor Systems. Empresa fundad por Trevor J. Cox y Peter D Antonio Hace 20 años, la cual se dedica a estudiar, diseñar y medir difusores acústicos. R.P.G. ha patentado varios diseños de difusores acústicos entre ellos los más conocidos se puede nombrar el skyline, profoam, motorized triffusor y difusor blox.

Peter D'Antonio y Trevor J. Cox han aportado mucho al desarrollo de la difusión en el mundo, con investigaciones, artículos y libros sobre secuencias generadoras, desarrollo de difusores y caracterización de los mismos. A continuación se denotan algunos de esos artículos y libros.

- Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application by Trevor J. Cox and Peter D'Antonio (Spon Press 2004).

[2] Teoría de la difusión. Tecniacustica. 2000.

- The QRD DI*F*FRACTAL: A New 1 or 2-Dimensional Fractal Sound Diffusor Dr. Peter D'Antoni*o.*

- The Reflection Phase Grating Diffusor: Design Theory and Application. PETER D'ANTONIO AND JOHN H. KONNERT.

Aun no siendo muy numerosas en la actualidad las empresas de acústica que se dediquen a producir difusores o paneles de difusión. Aunque en latinoamericana existen varias empresas que se han dedicado al estudio y diseño de difusores, como la del ingeniero Alejandro Bidondo quien a través de su empresa "ingeniería de sonido" ha investigado creado y construido muchos difusores aportando a este campo mucho avance científico e investigativo así como difusores optimizados y mucha documentación acerca de sus experiencias obtenidas en el laboratorio. Como esta herramienta es muy novedosa se hace complicado el diseño, ya que la normativa sobre construcción y diseño de estos no está establecida en ninguna identidad de estandarización como la ISO, la AES o la IEEE.

A continuación se mencionan empresas que se dedican al diseño y construcción de difusores.

- R.P.G. Diffusor Systems.
- DIASO (Dispositivos y sistemas acústicos y ópticos).
- Ingeniería de Sonido

Existe en Colombia una empresa dedicada al diseño y construcción de difusores llamada PROACUSTIX empresa que se dedica a dar soluciones acústicas y ofrece entre su portafolio de servicios difusores unidimensionales.

En la Universidad de San Buenaventura hasta la actualidad se han llevado a cabo tres trabajos sobre difusión, los cuales se realizaron a nivel de proyectos de grado, y consistieron en el diseño construcción y medición de difusores. A continuación se referencian dichos documentos.

- Diseño y construcción de un difusor anidado, con amplio ancho de frecuencias.
  Vergara Acosta, Mauricio José.
  Universidad de San buenaventura, facultad de ingeniería, ingeniería de sonido, 2005.
- Difusor poli cilíndrico variable en rango de difusión en función de la frecuencia.
  Perdomo Vargas, Edgar Mauricio
  Universidad de San Buenaventura, facultad de ingeniería, ingeniería de sonido, 2006.
- Construcción y optimización de un difusor Qrd para ampliar su rango de frecuencias útiles.
  Cabas Vanegas Carlos Andrés
  Cubides Domínguez Camilo Alexander
  Montaña Duret Andrés Felipe
  Universidad de San Buenaventura, facultad de ingeniería, ingeniería de sonido, 2005.

1.2 DESCRIPCION Y FORMULACION DEL PROBLEMA.

En el país es casi nula la producción de paneles de difusión bidimensionales que funcionen en un ancho extendido de frecuencias. Ahora, si bien se ha construido y aplicado algunos difusores en diferentes lugares del país, han sido difusores convencionales con métodos de cálculos específicos y se han usado para solucionar problemas específicos en recintos determinados, pero lo que no se ha hecho es elaborar un panel de difusión bidimensional con unidades especificadas y con un funcionamiento optimizado. Es por eso, que si bien no se ha investigado todo acerca de difusión, en el mundo ya existen paneles bidimensionales comerciales profesionales y empresas que se dedican a producirlos, y un sinnúmero de aplicaciones y soluciones acústicas usando este elemento, y no se ha definido algún método especifico de diseño y tampoco se ha estandarizado normativas de diseño y construcción sobre paneles de difusión, haciendo que el diseño de estos paneles sean un proceso único y muy ingenieril para cada diseñador de los mismos. Es por eso que en Colombia y aún más en la Universidad de San Buenaventura como pioneros en ingeniería de sonido, es imprescindible que estemos a la vanguardia en cuanto al estudio de difusión y construcción de paneles optimizados, es por esto que cabe preguntarse:

¿CUAL ES EL DISEÑO DE UN PANEL DE DIFUSION BIDIMENSIONAL DE ANCHO DE BANDA EXTENDIDO, ESPECIFICADO Y DE FUNCIONAMIENTO OPTIMIZADO?

1.3 JUSTIFICACION.

"Adelantándonos con conceptos acústicos muy modernos, se ha descubierto que dos de los parámetros acústicos más importantes de una sala son la espacialidad y el envolvimiento que la misma genera y que el oyente percibe. Estas propiedades dependen fuertemente de la de correlación binaural, tanto en la parte temprana de la respuesta al impulso del recinto como en la porción tardía de la misma. Esta propiedad es obtenible y/o maximizable con difusión, o sea utilizando difusores acústicos."[3]

En Colombia el estudio de difusión, la construcción y aplicación de los mismos no ha sido un campo hasta ahora muy fuerte, al punto que todavía no existe un conciencia clara en la sociedad colombiana que le de la importancia que se merece a las aplicaciones de los mismos. Al descubrir que el estudio de esta propiedad del sonido y su posterior aplicación ofrece soluciones acústicas, soluciones como minimizar la distorsión acústica, crear campo homogéneo dentro de un recinto, incrementar la inteligibilidad de la palabra, mejorar la estereofonía de un recinto y muchas aplicaciones más, se puede decir que no es de obviar la importancia que esta herramienta tiene sobre el diseño y tratamiento acústico de recintos asi como la importancia que tiene sobre las personas que se dedican al estudio y diseño de estos, desde ese punto de vista el querer construir un panel de difusión que se comporta en dos dimensiones con un funcionamiento optimizado, y que pueda ser aplicado como una solución acústica en más de un recinto se convierte en una herramienta novedosa e importante.

Las mayores limitantes de un difusor es su ancho de banda y sus dimensiones, puesto que a dimensiones muy grandes se haría muy difícil su instalación. Y su ancho de banda, ya que un difusor convencional no cubre todo el ancho de banda audible (20Hz-20kHz) haciendo necesario

[3] Difusión absorcion y acondicionamiento acústico. Ingeniería de sonido. 2002

implementar varios tipos de difusores en el recinto para lograr campo difuso en el rango de frecuencias audible. El panel que se propone, considera características que la mayoría de difusores no considera, siendo la más importante su ancho de banda extendido pero teniendo en cuenta que sus dimensiones no sean demasiado grandes, que el material elegido provea de buenas características físicas para el funcionamiento e instalación del difusor como lo es su fungibilidad, su densidad, su absorcion. Y que el funcionamiento de este sea optimizado en su coeficiente de difusión y sus patrones polares de dispersión. Todo lo anterior para que pueda ser considerado como una solución acústica en cualquier recinto que necesite de la implementación o mejoramiento del campo difuso.

Al diseñar un panel de difusión donde implícitamente se encuentran "varios difusores" distribuidos y organizados inteligentemente, para que la difusión cubra un ancho de banda útil (500Hz 4KHz) y que actué en dos dimensiones. Se crea un panel que solucionaría problemas de campo difuso en cualquier recinto convirtiéndose en una unidad comercial y que se podría aplicar en cualquier recinto donde el sonido tenga prelación.

1.4 OBJETIVOS DEL LA INVESTIGACION.

1.4.1 Objetivo general.

- Diseñar y construir un difusor bidimensional numérico.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Determinar el cálculo de dimensiones de un difusor bidimensional en un ancho de banda útil 500Hz-4kHz
- Diseñar la distribución de cavidades en dos dimensiones del difusor dentro de un panel cuadrado.
- Definir un material que presente buenas características de difusión.

- Construir el panel con los cálculos y diseño obtenidos.
- Realizar la medición de patrón polar y coeficiente de difusión en las dos dimensiones.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.

Alcances.

Existen algunos alcances que con el desarrollo de este proyecto se desean obtener, a continuación nombramos estos alcances.

- Continuar generando la conciencia de la importancia de la difusión, y su aplicación en recintos. Tanto en la rama científica e ingenieril como en la sociedad colombiana.
- Crear una unidad comercial que pueda ser introducida en la industria colombiana como herramienta de solución acústica.
- Estar a la vanguardia como universidad de San Buenaventura, programa de ingeniería de sonido, en construcción de paneles de difusión de ancho de banda extendido.

Limitaciones.

Se puede nombrar algunas limitaciones que debido al contexto del proyecto surgen a colación, estas limitaciones se mencionan a continuación:

- La escasez de información sobre difusión y su diseño, teoría, aplicación, y caracterización de difusores sonoros.
- La falta de un recinto óptimo (cámara anecoica) para la medición del coeficiente de difusión y patrón polar.
- La falta de software de medición con licencia legal (dirac, aurora- plugin) para el soporte de las mediciones obligando a utilizar versiones demo o versiones de evaluación.

2. MARCO DE REFERENCIA.

2.1 MARCO TEORICO – CONCEPTUAL.

2.1.1 Difusión[4]

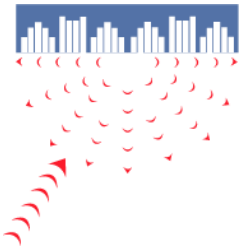
Hasta no hace mucho, las únicas opciones para tratar una sala desde el punto de vista acústico eran el reflejo y la absorción. La difusión o la dispersión o redistribución de la energía acústica, era reconocida como beneficiosa desde el punto de vista del sonido, pero era difícil de lograr.

Todo eso cambió hace 20 años aproximadamente, cuando una compañía llamada RPG Diffusor Systems comenzó a desarrollar innovadores productos de difusión que se basan en una teoría matemática.

La ventaja de la difusión se debe a que la energía del sonido se desparrama y no se absorbe, esa energía no se pierde, manteniendo de ese modo un sonido "vivo" en su sala.

Este tipo de difusión es difícil de describir ya que tiene sus orígenes en una matemática avanzada. Pero ha creado una revolución en cuanto al tratamiento del sonido que considera casi todos los aspectos de la producción y reproducción de sonido, desde salas de concierto mundialmente famosas hasta estudios de grabación e instalaciones de emisoras de primera categoría.

Figura 1. Esquema direccional de un difusor.



www.difusoresacusticos.com.ar.

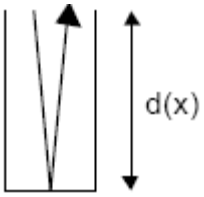
[4] Teoría de la difusión. Tecniacustica. 2001

2.1.2 Difusión acústica[5].

La teoría más influyente sobre la difusión acústica es la del investigador alemán Manfred R. Schroeder. Esta teoría permite diseñar estructuras altamente difusoras del sonido en un intervalo de frecuencias, y su eficacia se acostumbra a medir y representar por diagramas polares.

Las estructuras difusoras de Schroeder consisten en un conjunto de rendijas o ranuras de igual amplitud y diferente profundidad, siguiendo series numéricas que tienden a volver uniforme la respuesta polar. Esta respuesta se puede predecir a partir del retardo que crea cada rendija utilizando la teoría de Fraunhofer de campo lejano.

El retardo que introduce cada ranura se puede expresar como:



$$r(x) = e^{j2\pi \cdot \frac{d(x)}{\lambda}}$$

Ecuación 1, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

Donde d(x) es la profundidad de la rendija que hay en x. Estas profundidades son las que siguen la serie numérica Sn:

$$d(x)\,|_n = dn = \frac{S_n \cdot \lambda_0}{2 \cdot N}$$

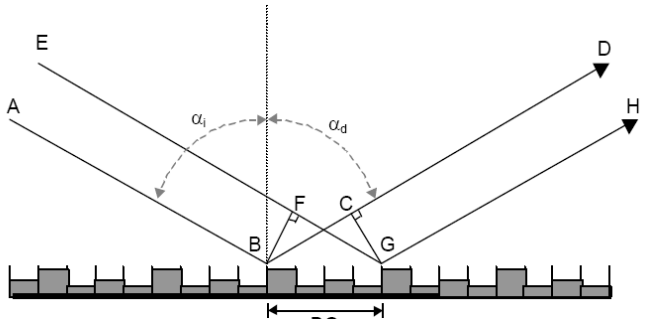
Ecuación 2, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

[5] Teoría de la difusión. Tecniacustica. 2001

Así pues, de cada ranura sale un frente de onda con una fase que nosotros podemos controlar y que se interferirá con los frentes de onda del resto de ranuras. En algunas direcciones, la interferencia es constructiva, dándose así el fenómeno conocido como difracción.

Con la teoría de campo lejano de Fraunhofer podemos calcular la amplitud de la dispersión (a(s)) en función de la magnitud del vector de dispersión *s* que contiene información del ángulo incidente y del de difracción:

Figura 2. Esquema del cálculo de la amplitud de la dispersión.



Teoría de la Difusión, tecnicacustica

La diferencia de caminos que tendremos entre los dos frentes de onda es BC-FG y lo podemos calcular como:

$$\left.\begin{array}{l} \sin\alpha_i = FG/BG \Rightarrow FG = BG\cdot \sin\alpha_i \\ \sin\alpha_d = BC/BG \Rightarrow BC = BG\cdot \sin\alpha_d \end{array}\right\} \Rightarrow \quad BC\text{-}FG = BC\cdot(\sin\alpha_d - \sin\alpha_i)$$

Ecuación 3, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

Así pues, en el difusor, el retardo ocasionado es:

$$e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\cdot(sin\alpha_d - sin\alpha_i)\cdot x}$$

Ecuación 4, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

Y definiendo el vector de dispersión como:

$$s = \frac{2\pi}{\lambda}(sin\,\alpha_d - sin\,\alpha_i)$$

Ecuación 5, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

La amplitud de la dispersión nos queda:

$$a(s) = \frac{1}{L}\int_0^L r(x)\cdot e^{j\cdot s\cdot x}\cdot dx$$

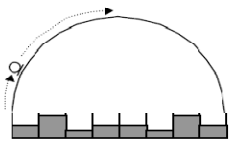
Ecuación 6, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

Que no deja de ser más que la Transformada de Fourier de r(x), que a su vez, es proporcional a la secuencia exponenciada. Por esto interesa que esta secuencia transforme en una constante en magnitud. Con ello conseguiremos un patrón de difracción uniforme.

La expresión del patrón de difracción es fácilmente programable aproximando la integral y trabajando en el dominio discreto.

Esto nos permite simular este patrón en un diagrama polar. Este diagrama polar también se puede medir moviendo una sonda intensimétrica a lo largo del semicírculo frontal del difusor, obteniendo para cada punto la intensidad de la reflexión en esa dirección.

$$|S(x)| = \frac{1}{Nx}\sqrt{\left[\sum_{k=1}^{Nx}\cos(sx - 4\pi\frac{d_k(x)}{\lambda})\right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{Nx} sin(sx - 4\pi\frac{d_k(x)}{\lambda})\right]^2}$$

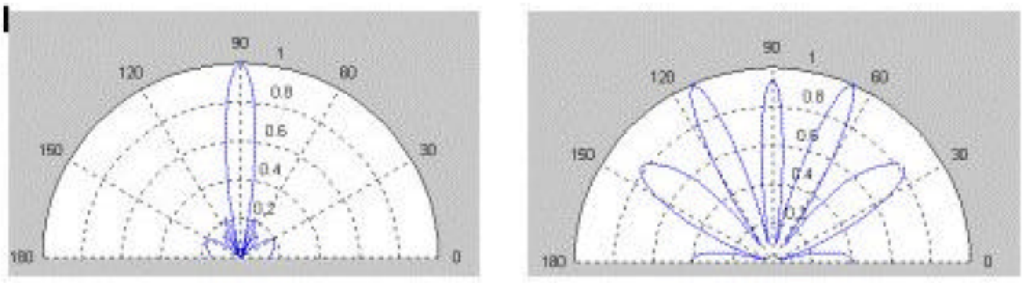


Ecuación 5, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

Para conseguir un diagrama polar correcto el número de puntos medidos ha de ser elevado, con esto tendremos la intensidad de la mayor parte de las reflexiones. Entre ellas hay que poder diferenciar la reflexión especular (siguiendo la Ley de Snell) del resto de reflexiones puesto que de la difusión depende la cantidad de energía que contiene cada una de ellas.

Así pues, una superficie con poca difusión reflejará mucha energía en la dirección especular y poca en el resto. El caso contrario será una superficie difusora que repartirá la energía entre las diferentes reflexiones.

Figura 3. Patrón polar normal vs. Difuso.



- Superficie poco difusora - Superficie difusora

Teoría de la Difusión, Tecniacustica.

El patrón de difracción podría expresarse en forma polinómica o en una matriz, pero de todas formas la cantidad de información que contendría sería excesiva para cualquier simulador. Además, hay que tener en cuenta que este patrón cambia según los materiales que rodean al difusor.

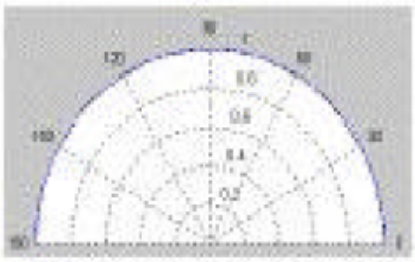
Por esta razón, a partir de estos diagramas polares se define un primer coeficiente llamado coeficiente de uniformidad de difusión. Este coeficiente es un único valor numérico que evalúa la uniformidad de la difusión y sigue la fórmula:

$$\delta_{uc} = \frac{\left(\sum_j I_j\right)^2 - \sum_j (I_j)^2}{(N-1)\cdot\left(\sum I_j\right)^2}$$

Ecuación 6, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

El coeficiente de uniformidad normalmente se evalúa para cada banda de frecuencia y su valor varía de 0 a 1, siendo 0 en superficies poco difusoras y 1 en superficies con difusión totalmente uniforme:

Figura 4. Representación del coeficiente de difusión.



$\Rightarrow \quad \delta_{uc}=1$

Teoría de la difusión, Tecniacustica

La naturaleza de este coeficiente lo hace apto para comparar difusores entre sí, nos da una idea cualitativa de la calidad de la difusión, pero no de cómo se distribuye la energía en las reflexiones. Por este motivo el coeficiente de uniformidad de difusión no es válido en los programas de simulación acústica de recintos.

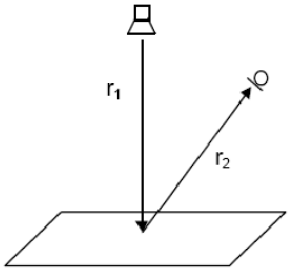
En la simulación acústica se tiende a introducir un coeficiente mucho más adecuado definido empíricamente como:

$$\delta = \frac{\text{Energía reflejada en direcciones no difusas}}{\text{Energía total radiada}}$$

Así pues, si un difusor refleja el 75% de la energía en su dirección especular y el 25% en otras direcciones, decimos que tiene coeficiente energético de difusión d=0,25 y denota un comportamiento claramente especular.

Este coeficiente contiene información de cuánta energía se difunde pero no de cómo se reparte entre las diferentes direcciones no especulares. Una aproximación aceptable es suponer que la energía de las direcciones no difusas se distribuye uniformemente en todas sus direcciones.

Como ejemplo de utilización del coeficiente energético de difusión podemos suponer que excitamos un difusor con una fuente omnidireccional situada frontalmente a r_1 metros de éste. La Intensidad en las direcciones no especulares será:



$$I_{dif} = W_{inc} \cdot \frac{\delta}{2 \cdot \pi \cdot r_2^{\,2}} = \frac{W \cdot S_{dif}}{4 \cdot \pi \cdot r_1^{\,2}} \cdot \frac{\delta}{2 \cdot \pi \cdot r_2^{\,2}}$$

$$I_{esp} = \frac{W \cdot (1 - \delta)}{4 \cdot \pi \cdot (r_1 + r_2)^2}$$

y en la dirección especular:

Ecuación 7, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

Hasta ahora únicamente hemos trabajado con las amplitudes de las reflexiones, y en todo caso, hemos mirado los retardos producidos en el difusor para saber en qué dirección tenemos interferencias constructivas. Experimentalmente hemos podido medir que para una misma dirección no especular, la reflexión de una estructura RPG va retrasada respecto a la de una estructura no difusora. Esto, sumado a que la contribución en el TR60 de la sala es mayor debido a que tiene mayor amplitud, confirma que el tiempo de reverberación incrementará con los difusores RPG.

Las medidas Energía-Tiempo nos muestran que la reflexión del difusor es de mayor amplitud y que además de estar retrasada su duración temporal es mayor.

Otro factor a tener en cuenta es que la difracción se produce de forma diferente en cada frecuencia. Matemáticamente es análogo a atenuar por diferente todos los coeficientes de la transformada de Fourier, o lo que es lo mismo, desfigurar completamente la señal temporal.

Esto se traduce en una disminución de la correlación cruzada entre diferentes reflexiones y puede ser interesante para disminuir la coherencia interaural en recintos donde interese. Ya estamos estudiando la correlación entre diferentes reflexiones y el siguiente paso será relacionar estos efectos con el coeficiente energético de difusión, d.

2.1.3 Difusores de Sonido basados en residuos cuadráticos[6].

Una solución interesante se tiene si hacemos que las profundidades sigan una secuencia dada por:

$$d_n = \frac{S_n \lambda_0}{2N}$$

Ecuación 8, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

Donde $S_n = n^2 \bmod(N)$.

Mod: Proporciona el residuo después de dividir un numero por un divisor.

N es un número primo y n entero menor de N

Ya que para, esta serie, la función de se aproxima a 1, lo cual era lo deseado. Este tipo de difusor se denomina de Residuos Cuadráticos.

El diseño del difusor se limita al siguiente procedimiento:

- Se selecciona la frecuencia de operación f_0. Este factor incidirá directamente en la profundidad máxima del difusor, ya que esta será un poco menor que media longitud de onda de la frecuencia f_0.
- La frecuencia máxima de operación será

[6] Teoría de la difusión. Tecniacustica. 2001.

$$f_{max} = \frac{c}{2W}$$

Ecuación 9, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

Donde W es el ancho de cada rendija y c es la velocidad del sonido, en otras palabras w es igual a la media longitud de onda de la frecuencia máxima.

- Si se desea tomar en cuenta el ancho de las láminas separadoras de las rendijas debe utilizarse la siguiente expresión:

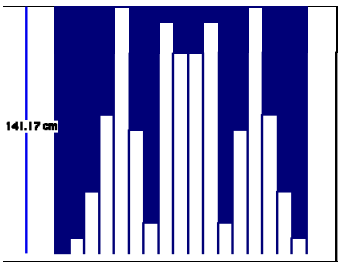
$$f_{max} = \frac{c}{2(W+T)}$$

Ecuación 10, Teoría de la Difusión. Tecniacustica.

Donde T es el espesor de las láminas.

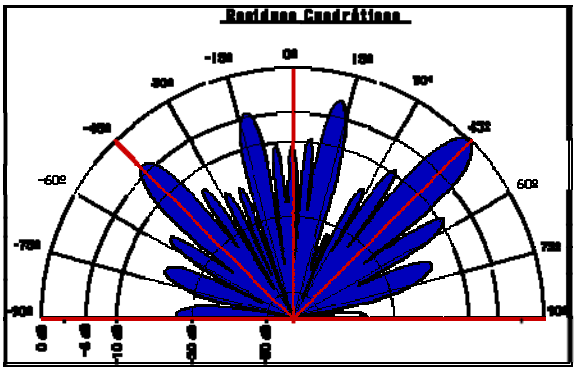
- Se selecciona el número primo considerando que mientras mayor sea se tendrá más lóbulos de difracción, pero se complicará su construcción. En general se utilizan números primos comprendidos entre 7 y 31. Si el lugar donde debe colocarse el difusor es muy grande, se pueden repetir varios períodos del mismo.
- Se calculan las profundidades de las rendijas con la ecuación 8.

Figuara 5. Difusor de sonido basado en residuos cueadraticos.



Difusores, teoría, diseño y aplicación.

Figura 6, Respuesta polar de un difusor basado en residuos cuadráticos.



Difusores, teoría, diseño y aplicación.

Para calcular un difusor bidimensional de ancho de banda extendido se uso una técnica basada y deducida de los fractales. A continuación se presenta la justificación de los fractales.

2.1.4 Fractales[7].

Un objeto fractal debería tener al menos una de las siguientes características:

- Existe similitud entre detalles a gran escala y a pequeña escala
- No se puede representar por medio de la geometría clásica
- Su dimensión es fraccionaria, es decir, no es entera
- Se puede definir recursivamente

Los fractales son figuras geométricas que no se pueden definir a través de la geometría clásica. Aunque el ser humano tiende a abstraer las figuras de los objetos a esferas, cuadrados, cubos, etcétera, la mayoría de las figuras que se encuentran en la naturaleza son de geometría fractal.

Una de las características más significativa de los fractales es que surgen a partir de acciones muy básicas, como el Conjunto de Cantor, que inicialmente parte de una recta y a partir de reglas muy básicas se convierte en una estructura compleja.

[7] Barnsley, M. Fractals everywhere. Academic Press Inc, 1988.

Otra de las características de los fractales es la auto similitud: cuando se cambia de escala en la representación de algún fractal la imagen que resulta es de gran similitud a la imagen origen. Por tanto, se puede decir que los fractales son autorecurrentes. Ejemplos de fractales con estas características son el Copo de nieve de Koch o los Conjuntos de Julia.

Una de las preguntas más complejas sobre los fractales es cuál es su tamaño?. Si se toma como ejemplo el copo de nieve de Koch, es posible afirmar que su dimensión no es exacta y que, por tanto, no se puede usar la geometría de Euclides para calcularla.

Cálculo de dimensiones fractales

En la sección anterior, hemos concluido como que la dimensión fractal es la que no se puede calcular a partir de la geometría de Euclides.

- La dimensión 0 es el punto
- La dimensión 1 es la línea

A continuación se explicará cómo podemos cuantificar el espacio definido por un fractal, para demostrar así que no se trata únicamente de un modelo teórico.

Si nos basamos en un objeto fractal con una dimensión entre 1 y 2, su longitud va a depender de la longitud de la regla con la que la calculemos. Cuanta más pequeña sea la unidad de medida más exacta será el resultado.

Si tenemos un espacio métrico (X,d), donde A es un subconjunto compacto no vacío de X, tomamos $B(x,\varepsilon)$, donde que $\varepsilon>0$, como esferas de radio ε y centro en el punto x.

Queremos calcular el menor número de esferas cerradas de radio ε necesarias para cubrir el conjunto A, denotado por $N(A,\varepsilon)$.

- N(A,ε): es el menor número entero tal que:

$$A \subset U_{n=1}^{M} B(x_n, \epsilon)$$

Ecuación 12, Fractals everywhere. Barnsley, M.

Donde x_n es un conjunto de puntos distintos {x_n; 1, 2, 3,…,N}.

Para demostrar si existe este número, cubrimos el conjunto A mediante conjuntos abiertos, rodeando todos los puntos x que pertenecen a A con una esfera abierta de radio ε. Como A es un conjunto compacto, está cubierta tiene una subcubierta finita M', y cerrando las esferas obtendríamos una cubierta de esferas cerradas M'.

Llamamos C al conjunto de todas las cubiertas de A que tienen como máximo M' esferas cerradas de radio ε.

Por tanto definimos f(c) como el número de esferas de la cubierta de c que pertenece a C:

- f: C > {1,2,3,…M'}

Por tanto, f(c) es un conjunto de números enteros positivos y este conjunto contiene un número menor. $N(A,\varepsilon)$

El conjunto A tendrá dimensión fractal D $N(A,\varepsilon) \approx C_e^{-D}$ donde f(ε) ≈g(ε) significa:

$$\lim_{\epsilon \to 0} (\ln(f(\epsilon)) / \ln(g(\epsilon))) = 1$$

Ecuación 13, Fractals everywhere. Barnsley, M.

Despejando D, se obtiene:

$$D \approx \frac{\ln(N, \epsilon) - \ln C}{ln 1/\epsilon}$$

Ecuación 14, Fractals everywhere. Barnsley, M.

Cuando ε tiende a 0, el término ln C / ln(1/ε) también tiende a 0, esto nos conduce a la siguiente:

- Sea A un subconjunto de X donde (X, d) es un espacio métrico. Y sea N(A,ε) el menor número de esfera cerradas de radio ε>0 necesarias para cubrir el conjunto A.

- Decimos que D es la dimensión fractal de A, si existe:

$$D = \lim_{\epsilon \to 0} \left[\frac{\ln(N, \epsilon)}{ln 1/\epsilon} \right]$$

Ecuación 15, Fractals everywhere. Barnsley, M.

- También se escribe como D=D(A) y se lee "A tiene dimensión fractal D"

2.1.5 Difusores de Sonido basados en residuos cuadráticos fractales[8].

Recientemente P. D' Antonio y J. Kornnert han desarrollado una versión de un difusor basado en residuos cuadráticos con una dimensión fractal. En este caso la secuencia de profundidades viene dada por:

$$d_n = \left(\text{truncado} \left[\frac{n}{N} \right] \right)^2_{\text{mod } M} \frac{\lambda_M}{2M} + (n_{\text{mod } M})^2_{\text{mod } N} \frac{\lambda_N}{N}$$

Ecuación 16, the QRD Diffractal: A New 1- or 2- Dimensional Fractal Sound Diffusor. Peter D'Antonio and John Kornnert. RPG Diffusor Systems, Inc.

Donde:

M número primo para la difusión en baja frecuencia.

N número primo para la difusión en alta frecuencia.

[8] The QRD Diffractal: A New 1- or 2- Dimensional Fractal Sound Diffusor. Peter D'Antonio and John Kornnert. RPG Diffusor Systems, Inc.

h número de la rendija.

l_M longitud de onda de diseño para baja frecuencia.

l_N longitud de onda de diseño para alta frecuencia.

d_h profundidad de la rendija h.

Difusores de Sonido Bidimensionales Fractal basados en residuos cuadráticos.
Se encuentra dado por la siguiente secuencia generadora.

$$d_{h,k} = \left(trunc\left[\frac{h}{N}\right]^2 + trunc\left[\frac{k}{N}\right]^2 \right)_{\bmod M} \frac{\lambda_M}{2M} +$$

$$+\left\{ \left(h_{\bmod M}\right)^2_{\bmod N} + \left(k_{\bmod M}\right)^2_{\bmod N} \right\} \frac{\lambda_N}{2N}$$

Ecuación 16, the QRD Diffractal: A New 1- or 2- Dimensional Fractal Sound Diffusor. Peter D'Antonio and John Kornnert. RPG Diffusor Systems, Inc.

Donde:

M = número primo para la difusión en baja frecuencia.

N = número primo para la difusión en alta frecuencia.

h,k = coordenada del sector.

l_M = longitud de onda de diseño para baja frecuencia

l_N = longitud de onda de diseño para alta frecuencia

$d_{h,k}$ = profundidad del sector h,k.

Los artículos de la AES mencionados se encuentran en el anexo A.

2.1 MARCO LEGAL O NORMATIVO.

Debido a que el estudio de difusores hasta hace 20 años atrás se empezó a investigar, la normativa acerca de medición, diseño o construcción no se ha establecido todavía en la Organización Internacional para la Estandarización (ISO). Y a nivel de Colombia no existe ninguna regla, ley o normativa donde especifique el diseño, uso o construcción de difusores, tanto en entidades gubernamentales como privadas.

Para la medición y caracterización del coeficiente de difusión, existe un documento de recomendación de la AES (Audio Engenering Society):

- AES 4iD- 2001:
  Este es un documento que establece la forma de caracterizar el patrón polar de dispersión de una superficie en incidencia normal y aleatoria, asi como la forma de caracterizar el coeficiente de difusión de cualquier superficie.

3. METODOLOGÍA.

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.

Ajustándose a las políticas de desarrollo de proyectos de grado de la universidad; el enfoque del proyecto es:

- Empírico – Analítico.

Debido que no existe ningún tipo de normativa sobre diseño o construcción, se convierte en un método totalmente empírico, pero partiendo de métodos de cálculo matemáticos ya establecidos. Con un método experimental de estudiar el campo difuso y diseñar un panel de difusión para luego ser medido e interpretado, intentando descubrir: el cómo y cuál es el diseño de un panel optimizado.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA.

Tecnologías actuales y sociedad.

Debido a que este proyecto, es un proyecto de ingeniería, y que en el se propone dar una solución para el mejoramiento de procesos acústicos en salas donde el sonido sea factor de prelación, se puede decir que la línea de investigación pertenece a, tecnologías actuales y sociedad, ya que todo el contexto vincula la implementación de tecnología actual en la rama de acústica para el mejoramiento sonoro de recintos, encaminado a ofrecerle a la sociedad colombiana una herramienta de mejoramiento acústico para ser aplicada en recintos (auditorios, teatros, estudios, etc.) con un único fin, de que los colombianos disfruten más de un espectáculo en vivo en un recinto o de una grabación musical.

Instrumentación y control de procesos.

Pertenece a la rama de instrumentación y control de procesos ya que la implementación de cualquier material diseñado para modificar y controlar la acústica de cualquier recinto dado, se considera un instrumento de control, instrumento que controla un proceso dentro de un recinto.

Acústica.

Es acústica porque, el estudio, control y solución de problemas manipulando las propiedades físicas del sonido como lo son absorción, reflexión, transmisión y difusión, pertenecen netamente a la rama de la acústica.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.

Al pretender construir un panel de difusión, se hace imprescindible pasar por cinco etapas de desarrollo del mismo, estas etapas son: estudio, cálculo, diseño, construcción y medición. Ahora describiremos como se desarrollará cada una de estas etapas.

3.3.1 Estudio:

Se debe tener claro que en el proceso de diseñar y construir un panel de difusión es necesario comprender a cabalidad los diferentes métodos de cálculo de los mismos asi como su fundamento teórico y sus diferentes tipos de características. Por eso en esta etapa del proyecto se estudia todo lo relacionado con teoría de difusión y tipo de difusores ventajas y desventajas.

3.3.2 Cálculo:

Utilizando los diferentes métodos de cálculo presentados en los marcos de referencia y teórico, se procede a calcular las cavidades y dimensiones para cada banda de octava que requiere el panel de difusión, ajustándose a los parámetros establecidos por dichos métodos y acoplando, si es necesario dos o más métodos para cumplir con las características establecidas en los objetivos del

proyecto, características como su ancho de banda de 500Hz – 4KHz. Además de definir el material y/o los materiales sobre los cuales se va a construir el difusor, ajustándose a fundamentos teóricos sobre coeficientes de absorción y difusión de estos materiales. Se define el material del panel de difusión en esta etapa ya que las propiedades de este (densidad, espesor, inflamabilidad) afectan imprescindiblemente el diseño del panel.

3.3.3 Diseño:

Una vez obtenido el cálculo de todas las cavidades y dimensiones que van a contener el panel de difusión y de haber definido el material de construcción se empieza a distribuir esas cavidades dentro de un panel cuadrado de dimensiones no muy grandes, sin romper en ningún momento los parámetros y leyes de cálculo de los métodos implementados, se debe tener en cuenta que esta distribución de "difusores" en un solo panel tiene que comprender las dos dimensiones. En esta etapa de desarrollo no es de obviar correcciones sobre el diseño final, ya que no es concluyente el comportamiento del difusor una vez se haya diseñado el panel. Además de definir el material sobre el cual finalmente se construirá el panel de difusión, este será definido bajo criterios como fácil manejo, practicidad para transportarlo, buenas propiedades físicas de difusión y absorción, y poca fungibilidad.

3.3.4 Construcción:

Al obtener el diseño del panel de difusión así como sus materiales de construcción, se procede a construir el panel ajustándose exactamente el diseño final, para evitar errores de construcción respecto al diseño final, la construcción del panel estará en manos de personal idóneo en mano factura especializada para realizar este tipo de trabajo Todo esto con el fin de que el difusor construido sea exactamente igual en sus dimensiones que el difusor diseñado.

3.3.5 Medición:

Al contar con el panel construido, se procede a medir minuciosamente el patrón polar y coeficiente de difusión bajo incidencia normal y aleatoria, en características acústicas óptimas y con instrumentación de medición especializada (sonómetro integrador tipo I, micrófono de medición y software de medición), así como su posterior análisis de datos, y entrega de resultados.

Para la parte de medición de las características del panel se usaran instrumentos de medición especializado así como métodos de medición minuciosos a continuación mostramos los instrumentos de medición a utilizar.

Para mediciones de patrón polar y coeficiente de difusión en incidencia normal se usara un sonómetro SVAN 943B de marca svantek. El cual es un instrumento de medición tipo I, con medidor de SPL, Leq, SEL, Ln, percentiles y evolución temporal, con una memoria de 48 Mb y un rango de medición de 27- 130 dB(A) RMS y análisis en tiempo real RTA de 1 y 1/3 octava. Un micrófono de medición behringer ECM-8000, una interface de audio digidesing MBOX-1, una cabina JBL EON 10 G2.

La medición del panel se llevara a cabo en un recinto donde las propiedades acústicas sean óptimas para realizar la medición. O en cámara anecoica o al campo libre según lo especifique el documento de recomendación AES 4iD – 2001.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA.

En el desarrollo del proyecto no se hará ningún tipo de encuesta ni se involucrará a ningún tipo de población en ninguna de las etapas del proyecto debido a que el producto final será medido con instrumentación especializada, tipo laboratorio y es la única recolección de información que se hará y su posterior análisis de datos.

3.5 HIPÓTESIS.

Se puede diseñar y construir un difusor numérico de cuatro bandas de octava, especificado y de un funcionamiento optimizado en un panel cuadrado aplicando y unificando varios tipos de difusores siguiendo sus métodos de cálculo y tomando en cuenta sus características particulares.

3.6 VARIABLES.

3.6.1 Variables independientes.

- Tipos de difusores que se apliquen.
- Material o materiales sobre el cual se elabora el panel de difusión.

3.6.2 Variables dependientes

.

- Mano de obra calificada que se encarga de la construcción del difusor.
- Dimensiones del panel.
- El instrumento de medición y las condiciones de medición con el cual se realice la medición de las características del difusor.

4. DESARROLLO INGENIERIL.

A continuación se enuncia el proceso paulatino que se desarrolló para lograr diseñar y construir un difusor numérico bidimensional.

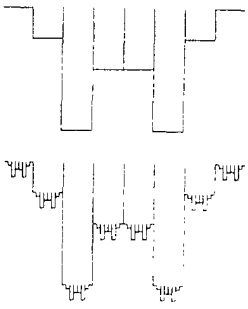
4.1 Diseño:

Al diseñar un panel de difusión se parte de varios factores los cuales van ayudar a delimitar parámetros de diseño y mejorarán el proceso de busca de información y toma de decisiones de dichos parámetros. Si se requiere diseñar un difusor bidimensional que distribuya la energía deliberadamente y que tenga un coeficiente de difusión elevado, se definen las secuencias generadoras numéricas solo a secuencias bidimensionales. Los únicos métodos de cálculo que se encontraron para secuencias bidimensionales fueron en difusores tipo QRD (difusores de residuos cuadráticos) y difusores tipo PRD (difusores de raíces primitivas), lo cual ayudó a demarcar la búsqueda de información solo hacia propiedades y secuencias generadoras de esos dos tipos de difusores. En esa recolección de información se encontró que existen difusores de tipo difractal, consisten en dos difusores de tipo fractal, uno para cubrir medios bajos y otro para cubrir difusión en altas, el difusor de altas frecuencias se encuentra implícito en el de bajas y juntos trabajan como uno solo para cubrir un ancho de banda útil. Según esto, con un difusor difractal se puede cubrir anchos de banda extendidos en difusión siendo el método que más se acerca a cumplir los objetivos propuestos en este proyecto, ya que los difusores QRD y PRD proponen una cobertura de 3 bandas de octava, y se diferencian entre ellos por su concepción matemática de calcular la secuencia generadora y las dimensiones de sus cavidades. Una vez se supo esto se empezó a investigar quien había descubierto los difráctales, y en donde se encontraba la fuente precisa la cual explicara el concepto matemático del mismo. Este proceso de búsqueda y recopilación de información llevó mucho más tiempo del previsto ya que la información sobre estos difusores fractales y difráctales es muy escasa, en cuanto a bibliografía y autores. Después de una extensa búsqueda de información, se llegó a que Peter D. Antonio, Trevor J. Cox y Jhon Kornnert, son tres ingenieros miembros de la AES y fundadores de R.P.G Sound Systems que se dedican al estudio e investigación de difusores

sonoros, y estos mismos publicaron en septiembre de 1990 en la convención 89 de la AES en los Ángeles california un artículo llamado "The QRD Diffractal: A New 1- or 2- Dimensional Fractal Sound Diffusor"(El Qrd difractal: un nuevo difusor de sonido fractal de una y dos dimensiones) en este artículo se encuentra explicado el concepto matemático de los difusores fractales de una y dos dimensiones, así como la explicación de sus métodos de cálculo y parámetros de diseño y algunos ejemplos demostrativos. Una vez estudiado el artículo y comprendido las bases teóricas de los fractales y la generación de los difráctales se procedió a programar las secuencias generadoras y los parámetros de diseño del panel, estas secuencias se programaron en una hoja de cálculo usando el programa Microsoft Excel, se programaron para poder variar los parámetros de los dos difusores que iba a contener el panel, ya que todavía no había un diseño establecido.

Para poder calcular el ancho de los fractales del difusor y la profundidad de las dimensiones se dedujo del estudio del siguiente artículo "The Reflection Phase Grating Diffusor: DesignTheory and Application"(la reflexión en fase en difusores de rejas, diseño teoría y aplicación), el cual fue publicado por Peter D. Antonio y Jhon Kornnert a nombre de R.P.G Sound Systems. Allí explican el fundamento teórico y la base científica de los difusores numéricos como los difusores de Schoeder, quien dedujo las secuencias generadoras básicas de los difusores numéricos, los artículos de la AES anteriormente mencionados se encuentran en el anexo A.

Figura 7, ejemplo difusor Difractal,

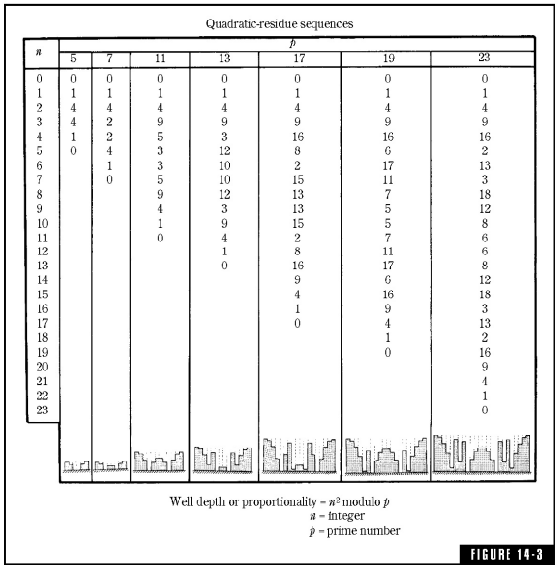


The QRD Diffractal: A New 1- or 2- Dimensional Fractal Sound Diffusor. Peter D'Antonio and John Kornnert. RPG Diffusor Systems, Inc.

Se estableció el diseño y la construcción de un difractal bidimensional de tipo QRD, el cual iba a tener un orden de difusión mayor que 7, ya que de este depende que la difusión se haga en más

direcciones; entre mayor sea la difusión mucho mejor, pero también de él depende la dimensión del panel ya que un orden de difusión muy alto (23, 53) nos implicaría un panel muy grande creando así una unidad no tan útil para aplicarla en diferentes recintos. Según lo anterior el orden de difusión iba a estar delimitado por las dimensiones del panel. En la figura 8 se puede ver como el orden de difusión afecta directamente las dimensiones del panel.

Figura 8. Secuencia de residuos Cuadráticos



Difusores Numéricos, Diseño Teoría Y aplicación.

Ahora bien como se iba a realizar un difractal bidimensional también se empezó pensar en que material se podía fabricar, puesto que un difusor de este tipo implica un arduo manejo del material debido a que está hecho sobre columnas de diferentes dimensiones, lo cual hizo pensar en un material que sea de fácil manejo para cortarlo, que no sea muy pesado, ni muy fungible pero que a su vez tenga un coeficiente de absorción bajo, además que se ajuste a un presupuesto comodo para poder sacar unidades comerciales del mismo. Si queremos crear una unidad que disperse el sonido en varias direcciones debemos aplicar un material altamente reflejante por lo menos a las frecuencias donde el difusor va ser útil, según lo anterior, lo primero que se piensa es en un material no poroso, rígido, que refleje el sonido, materiales como el acrílico, el vidrio, el aluminio, pero todos estos materiales fueron descartados puesto que se busca un complemento de todo lo anterior, y los que no son muy manejables como el vidrio son excesivamente costosos o pesados y fungibles como

el acrílico, además de que los materiales nombrados poseen resonancias en medios y altos que se encuentran en el rango útil de frecuencias del panel, entonces se debe abordar un material que posea su resonancia fuera de nuestro rango útil de difusión. En un foro de difusión se hablaba del "poliestireno expandido de alta densidad", como un buen material para la fabricación de difusores, fue así como se empezó a investigar las propiedades del material y llegando a deducir que este posee las características óptimas para la construcción del panel, ahora bien se empezó a investigar si en Colombia se producía poliestireno expandido de alta densidad y cuál era su costo y presentación, encontrando que FORMAPLAC S.A lo fabricaba por laminas de varias dimensiones desde 1 cm de espesor hasta 10cm. Se necesitaba láminas de la mayor densidad, puesto que a mayor densidad menor absorción y para construir un difusor fractal se necesita un material reflejante, se eligió densidad 30 (30 kg por metro cubico) ya que es la densidad más alta que fabrican en Colombia. Se escogió este material porque posee características únicas de reflexión, fácil corte, poco inflamable, relativamente liviano, todo lo anterior lo hace un material práctico para la construcción de difusores. La misma empresa dijo cómo se manejaba el corte de este material, el cual consiste en usar un hilo de ferroníquel caliente de un calibre muy delgado para poder cortarlo. La ficha técnica del poliestireno expandido de alta densidad así como su coeficiente de absorción se encuentran en el anexo B.

Se define el material sobre el cual el panel de difusión iba a ser construido. Una vez sabíamos en que dimensiones se producían las láminas se pudo determinar los parámetros de diseño del difusor como su orden de difusión y frecuencias útiles en altas y en bajas para el primer fractal. Según esto se dedujo los parámetros de diseño del panel así:

- El ancho de cada fractal va estar dado por media longitud de onda de la frecuencia más alta donde va actuar el primer difusor fractal.

Si se conoce que las láminas de poliestireno se producen cada centímetro de expesor, adaptando la frecuencia útil del primer fractal a algún expesor de las láminas se ganaría más precisión en el corte de los fractales además que se podría definir de una vez el orden de difusión sabiendo que dimensiones implicaría.

Para esto se empezó con un orden de difusión de n=17 y se calculan frecuencias de longitudes de onda de 6, 8, 10 y 12cm. A continuación en la tabla 1. Se indica la frecuencia y las dimensiones del panel según el orden de difusión.

Hz	Λ	λ/2	N=7	N=13	N=17
5700	6	3	21	39	51
4280	8	4	28	52	68
5700	10	5	35	65	85
2920	12	6	42	78	102

Tabla No. 1. Relación de frecuencia, longitud de onda y orden de difusión,

De las siguientes longitudes se obtienen las frecuencias en altas para el primer fractal y así mismo las dimensiones en cm según su orden de difusión. Como se puede apreciar en la tabla con fractales de 4cm de ancho se puede llegar a cubrir hasta 4280 Hz y si se elabora un difusor de orden 13 implicaría una dimensión de 56 cm dimensión que se considera práctica para la realización de un panel.

Una vez se define el orden de difusión y la dimensión de cada fractal y por ende del panel; se procede a definir la frecuencia baja útil del primer difusor.

Media longitud de onda de la frecuencia más baja del difusor determina el fractal más largo. Se parte del criterio de un panel de difusión que pueda ser aplicado como una unidad comercial en varios recintos donde se necesite crear campo difuso, por eso el alto del panel debe estar en el punto el cual llegue a una frecuencia lo más baja posible sin que perjudique las dimensiones considerables del mismo para ello se define:

Hz	λ/2
750	23cm

Tabla No.2. Longitud de onda para 750Hz.

Una vez se obtuvieron los parámetros de diseño se procedió a encontrar la matriz deducida de la siguiente secuencia generadora:

$$d_{h,k} = \left(trunc\left[\frac{h}{N}\right]^2 + trunc\left[\frac{k}{N}\right]^2 \right)_{\bmod M} \frac{\lambda_M}{2M} + \left\{ \left(h_{\bmod M}\right)^2_{\bmod N} + \left(k_{\bmod M}\right)^2_{\bmod N} \right\} \frac{\lambda_N}{2N}$$

Donde:

M = número primo para la difusión en baja frecuencia.

l_M = longitud de onda de diseño para baja frecuencia

N = número primo para la difusión en alta frecuencia.

l_N = longitud de onda de diseño para alta frecuencia

h,k = coordenada del sector.

$d_{h,k}$ = profundidad del sector h,k

De la siguiente ecuación deducimos la siguiente matriz que se presenta a continuación.

Figura No.9. Secuencia obtenida, para difusor bidimensional.

0	0	1	3	1	4	3	3	4	1	3	1	0	0
0	1	2	3	1	4	3	3	4	2	4	2	1	0
1	1	2	4	2	5	4	4	5	2	4	2	2	1
3	3	4	6	4	6	6	6	6	4	6	4	3	3
1	1	2	4	2	5	4	4	5	2	4	2	1	1
4	4	5	6	5	7	7	7	7	5	6	5	4	4
3	3	4	6	4	7	6	6	7	4	6	4	3	3
3	3	4	6	4	7	6	6	7	4	6	4	3	3
4	4	5	6	5	7	7	7	7	5	6	5	4	4
1	1	2	4	2	5	4	4	5	2	4	2	1	1
2	3	4	6	4	6	6	6	6	4	6	4	3	2
1	2	2	4	2	5	4	4	5	2	4	2	2	1
0	1	2	3	1	4	3	3	4	1	3	2	1	0
0	0	1	3	1	4	3	3	4	1	3	1	0	0

Una matriz de orden 13 generada para un difusor bidimensional fractal que cubra desde 750Hz hasta 4280Hz, la siguiente matriz lo único que dice son factores de multiplicación de la menor longitud de onda. Luego basta con multiplicar por λ /2n para obtener las profundidades de cada fractal en cada sector. Según esto se obtuvo lo siguiente:

Posicion en matriz	No de partes	Dimensiones en cm
0	4	23x8x4
0	4	23x4x4
11	6	19.71x8x4
1	14	19.71x4x4
22	5	16.43x8x4
2	15	16.43x4x4
33	13	13.14x8x4
3	2	13.14x4x4
44	15	9.86x8x4
4	19	9.86x4x4
5	16	6.57x4x4
6666	4	3.29x16x4
66	2	3.29x8x4
6	4	3.29x4x4

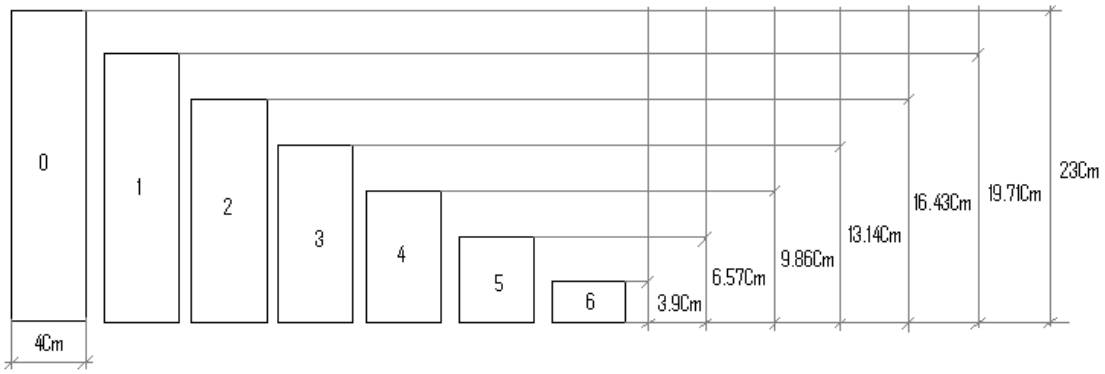
Tabla No. 3. Relación de Fractales en dimensiones y Cantidad.

Figura 10 Matriz Con factor de Profundidad Para difusor Bidimensional Fractal, 750Hz – 4280.

0	0	1	3	1	4	3	3	4	1	3	1	0	0
0	1	2	3	1	4	3	3	4	2	4	2	1	0
1	1	2	4	2	5	4	4	5	2	4	2	2	1
3	3	4	6	4	6	6	6	6	4	6	4	3	3
1	1	2	4	2	5	4	4	5	2	4	2	1	1
4	4	5	6	5	7	7	7	7	5	6	5	4	4
3	3	4	6	4	7	6	6	7	4	6	4	3	3
3	3	4	6	4	7	6	6	7	4	6	4	3	3
4	4	5	6	5	7	7	7	7	5	6	5	4	4
1	1	2	4	2	5	4	4	5	2	4	2	1	1
2	3	4	6	4	6	6	6	6	4	6	4	3	2
1	2	2	4	2	5	4	4	5	2	4	2	2	1
0	1	2	3	1	4	3	3	4	1	3	2	1	0
0	0	1	3	1	4	3	3	4	1	3	1	0	0

A continuación se indica un esquema sobre la dimensión de cada fractal cabe anotar que todos los fractales tienen 4cm de expesor.

Figura No.11. Plano de Corte, Fractales.



El Fractal número 7 es de longitud 0 por lo tanto no existe.

Una vez se tiene la tabla especificando cuantos fractales y de que dimensiones se iban a utilizar se había finalizado el diseño del primer difusor fractal. Ahora se hace necesario diseñar el segundo fractal, que básicamente consiste en un fractal para frecuencias altas.

Para el diseño del segundo fractal, se parte de unos parámetros fijos y ya establecidos,

- El primero es que tenemos un área de 4cm cuadrados para diseñar un difusor que cubra altas frecuencias.
- El segundo es que la mínima frecuencia a cubrir del difusor será 4KHz

Según lo anterior, lo primero que se pensó fue en el orden del difusor del segundo difusor fractal.

Si se calcula de 7, significa 8 cavidades en un ancho de 4 cm, por lo que los fractales darían muy delgados y por ende su frecuencia difusión límite para frecuencias altas sería muy elevada y estaría a una frecuencia inaudible. Entonces se parte de diseñarlo de orden 5, ósea 6 fractales en 4 cm, lo cual indica que los fractales serian de 0.67 cm de ancho, si se sigue la idea de que el ancho define

la frecuencia alta con media longitud de onda se deduce que la frecuencia máxima donde actuara nuestro difusor fractal de altas será en 25KHz.

Para un difusor unidimensional fractal de orden 5 se obtiene la siguiente secuencia.

0	1	4	4	1	0

Tabla No.4 Secuencia obtenida para difusor Qrd fractal de 4k a25k.

El cálculo de las profundidades viene dado por:

$$d_n = \frac{S_n \lambda_0}{2N}$$

Donde $S_n = n^2 \bmod(N)$

N es un número primo y n entero menor de N

Con una frecuencia mínima de 4KHz y una máxima de 25KHz se obtuvieron las siguientes dimensiones de los fractales.

N	Cm
0	0
4	2.5
1	1.8

Tabla No. 5. Dimensión De los fractales 2 según su secuencia.

Figura No. 12, Plano de corte Fractal Qrd 4k-25k

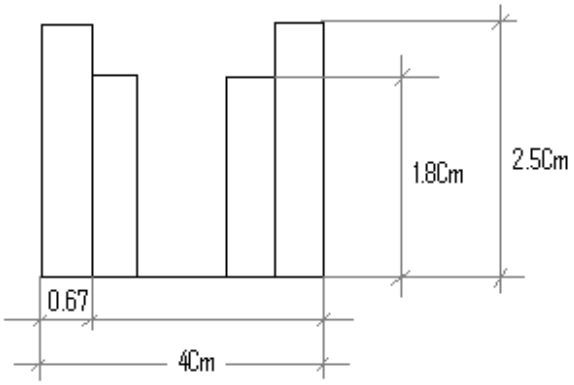
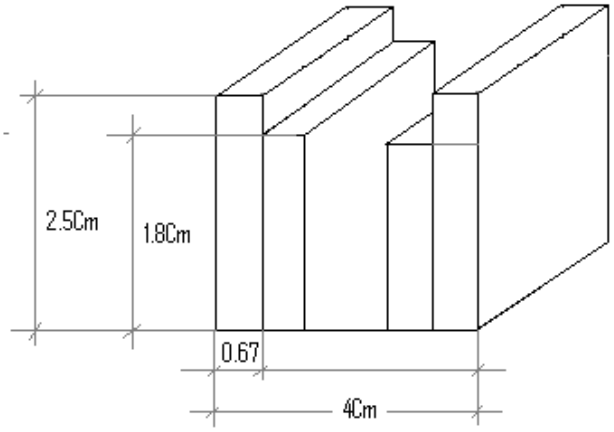
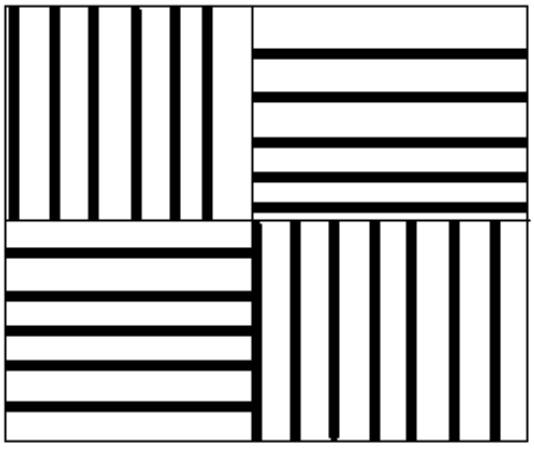


Figura No. 13, Difusor Fractal Qrd 4k-25k en 3 dimensiones



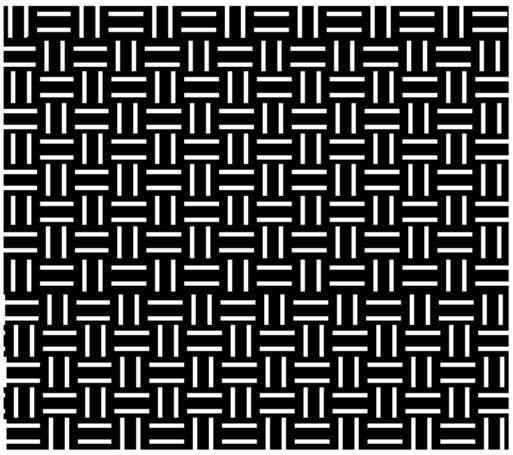
Como la secuencia del primer difusor es una secuencia bidimensional y la del otro es una unidimensional, para que pueda actuar en dos dimensiones se aplicó el siguiente criterio.

Figura No.14. Esquema De aplicación de Fractal Qrd De una dimensión para cubrir 2 dimensiones.



Difusores unidimensionales aplicados perpendicularmente intercalados forman difusión en las dos dimensiones, este criterio hace mucho más fácil ya que hacer fractales bidimensionales en un área de 4cm cuadrados se torna muy complicado, entonces se aplicara el QRD unidimensional intercalándolo perpendicularmente para lograr una difusión bidimensional.

Figura 15 No. Esquema Difractal De orden 13-5.



A continuación se especifican la cantidad de partes que se necesitaran para poder realizar el siguiente difusor fractal y aplicarlo al primer fractal intercalado en una matriz de 14 X14.

No de fractales	Dimensiones en Cm
392	2.5x0.67x4
392	1.8x0.67x4

Tabla 6 No. Numero de fractales necesarios para difusor 2.

Una vez realizado el diseño y definido el material del difusor se procede a pasar al paso de su construcción.

4.2 Construcción.

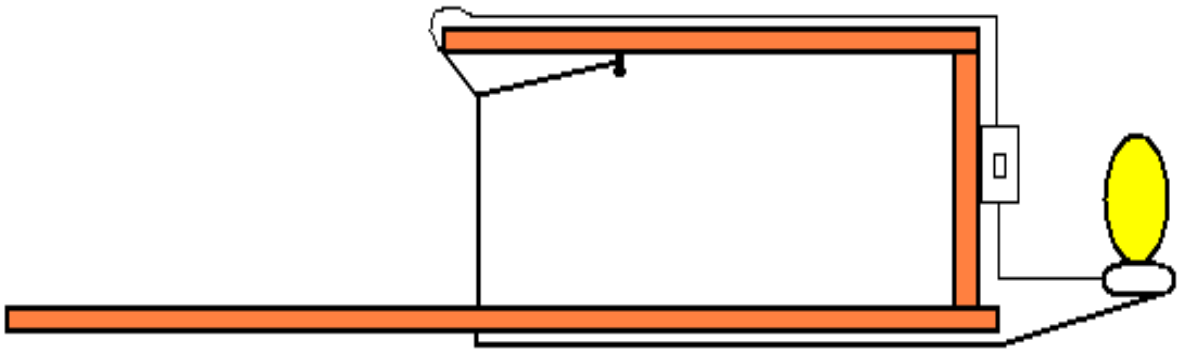
Para construir el difusor difractal se adquirieron 8 láminas de poliestireno expandido de alta densidad de 1mX1m y 4cm de espesor, y dos de 1m x 1m y 2cm de espesor, las láminas de 2cm se usarán para cortarlas en tramos de 0.56m X 0.56m, esta servirá de base sobre la cual el difusor se construirá.

Imágen 1. Láminas de poliestireno expandido de alta densidad



El poliestireno expandido se corta en caliente con hilo de ferroníquel, para poder lograr cortes precisos se tuvo que fabricar una cortadora de poliestireno la cual consiste en un circuito simple conectado a un hilo de ferroníquel de calibre muy pequeño, el cual va templado y lo mas derecho posible ya que de esto depende la perfección de los cortes.

Figura No 16. Esquema de cortador de poliestireno.



En este esquema se especifica la cortadora de poliestireno, el hilo de ferroníquel se templó a otro hilo para poder manejar el ángulo de corte y tener un corte preciso siempre.

Imagen No 2. Cortador de poliestireno.



Al tener la cortadora se procedieron a cortar 196 fractales de diferentes dimensiones ya mencionadas. Para lograr un corte preciso y lo mas recto posible se marcó sobre base de la cortadora las diferentes dimensiones, y con una escuadra asegurada con cinta de empacar se garantizó los corte rectos en las diferentes longitudes nesesarias.

Imagen No 3. Ejemplo de corte de Fractales de Poliestireno.



A continuación en la figura 4 se muestran 6 fractales de los 7 del diseño del difusor, la columna 7 es de longitud 0 por lo cual no se hace necesario crearla.

Imagen No 4. Fractales bidimensionales.



Para cortar los fractales se procedieron a cortar tramos de 4cm x 4cm de las láminas y algunos tramos de 8cm x 4cm como lo muestra la siguiente imagen.

Imagen No 5. Tiras de poliestireno de 4 X 4 Cm.



Luego de eso se procedió a cortar los fractales a las alturas correspondientes, se hizo de esta manera para garantizar uniformidad de todos los fractales. Luego se dispuso a pegar en la lámina

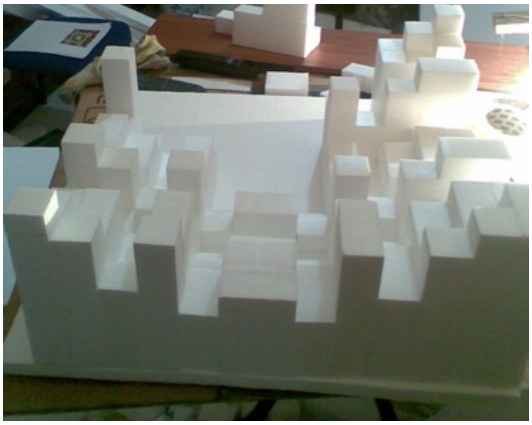
de 0.56m x 0.56m x 0.02 cada fractal de acuerdo con el diseño original, el pegante que se uso es un pegante llamado Multipega, una especie de silicona especial para pegar maderas.

Imagen No 6. Construcción del difusor Fractal 1.



La puesta de los fractales se realizó minuciosamente cuidando que no quedaran espacios libres entre ellos y que quedarán bien pegados por todos los lados.

Imagen No 7. Construcción del difusor Fractal 1.



Una vez los primeros fractales estuvieron secos, pegados y firmes se procedió inmediatamente a cortar los fractales del segundo difusor en tiras de 0.67cm de espesor, y de 2.5cm y 1.8 respectivamente. Y se pegaron antes de unirlas al difusor 1.

Imagen No 8. Tiras cortadas y pegadas entre sí para difusor 2.



Se cortaron en tramos de 4 Cm de largo y se procedió a pegar sección por sección en cada fractal del difusor 1.

Imagen No 9. Construcción del difractal.

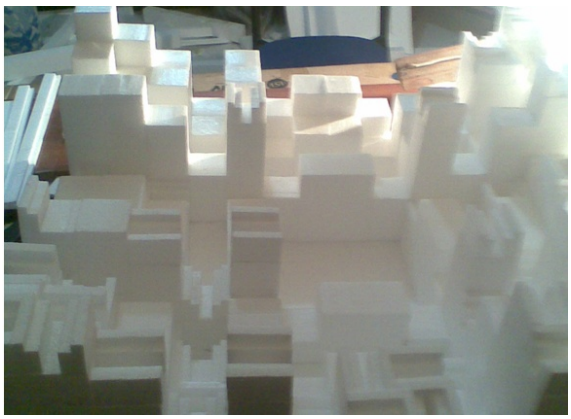


Imagen No 10. Construcción del difractal.



Imagen No 11. Difusor BD-0516.



4.3 Medición.

Una vez se terminó el diseño y construcción del difusor se procedió a la medición del patrón polar a incidencia normal, y a la caracterización del coeficiente de difusión. Esta medición se hizo bajo los parámetros escritos en el documento de recomendación de la AES 4iD – 2001. A continuación se mostrará el esquema de la medición y algunos registros fotográficos y gráficas significativas del coeficiente de difusión y patrón polar. También se explicará cómo se realizó la medición.

Se midió con el método de respuesta al impulso estableciendo las distancias y posicionamiento de fuente y receptor, dentro de los parámetros del documento de recomendación de la AES. Midiendo el difusor con puntos de receptores posicionados en media circunferencia angulados cada 5 grados,

realizando cada medición para cada dimensión y posiciones de fuente a 0 (incidencia normal) y 55 grados (incidencia aleatoria). La instrumentación utilizada para esta medición fue la siguiente.

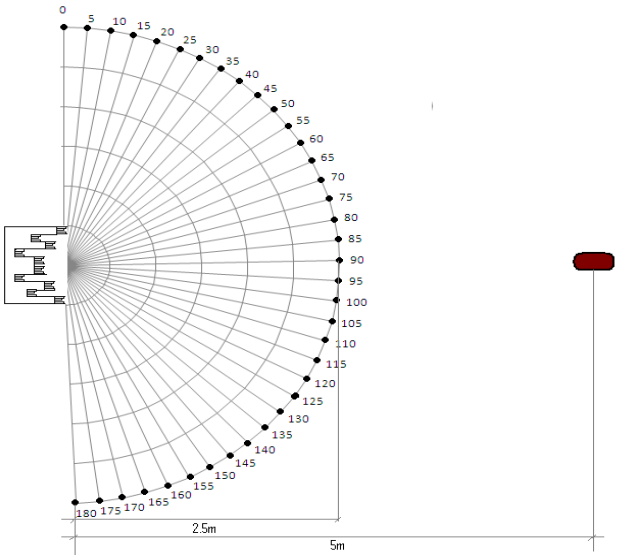
- Micrófono de medición ECM-8000.
- Consola Behringer euro rack 6 canales.
- Interface de audio digidesing Mbox 1.
- Computador portátil.
- Cabina JBL –EON 10 - G2.

El programa que se usó para las grabaciones de los impulsos fue adobe adution. La señal que se generó fue un LSS (lineal sine sweep) durante 14 seg. Se grabó la señal de salida durante 15 seg para cada punto de receptor y posición de fuente. De lo anterior se obtuvieron 185 grabaciones correspondientes a las siguientes configuraciones.

- 37 grabaciones para la dimensión 1 con fuente a 0 grados de incidencia.
- 37 grabaciones para la dimensión 2 con fuente a o grados de incidencia.
- 37 grabaciones para la dimensión 1 con fuente a 55 grados de incidencia.
- 37 grabaciones para la dimensión 2 con fuente a 55 grados de incidencia.
- 37 grabaciones para superficie del mismo material y dimensiones a 0 grados de incidencia de la fuente.

En la figura 17 se indica el esquema de medición utilizado para incidencia normal (fuente 0 grados).

Figura 17 No. Esquema de medición difusor BD-0516



Una vez se obtuvieron las grabaciones del LSS se halló la respuesta al impulso para cada medición por medio de la deconvolución de la señal de entrada con la de salida, luego se estableció niveles en tercio de octava a través de una FTT (Fast fourier trasform) para el sonido directo y reflejado en cada respuesta al impulso obtenida.

La fuente fue calibrada a 102dB en Tot_lin, de acuerdo con el ruido de fondo el cual se midió durante 5min obteniendo un Leq de 54 db; la fuente fue calibrada a ese nivel ya que era necesario tenerla mínimo 40 db arriba del ruido de fondo según documento AES.

Figura No 18. Medición de ruido de Fondo en el lugar y hora de Medición.

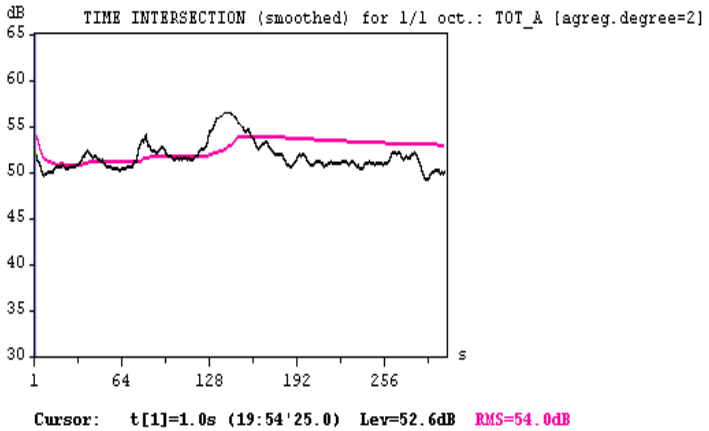


Imagen No 12. Medición de dimensión 1, en el punto de 20 grados fuente a 0 grados.



La superficie plana se midió con fines comparativos, más no porque el documento de recomendación de la AES lo requiera para caracterizar el coeficiente de difusión y patrón polar.

Imagen No 13. Fuente a 5m en incidencia aleatoria.



Imagen No 14. Medición patrón polar y coeficiente de difusión BD - 0516



Imagen No 15. Superficie plana de referencia, mismo material, mismas dimensiones.



5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Una vez se obtuvieron los niveles en tercio de octava para cada punto medido se procedió a establecer el coeficiente de difusión y patrones polares de dispersión todo esto para cada posición de fuente y cada una de las dimensiones del difusor.

Los datos obtenidos se relacionaron mediante la siguiente expresión.

$$1 - \left(\frac{10^{L_{REF}/10} - 10^{L_I/10}}{10^{L_{REF}/10}} \right)$$

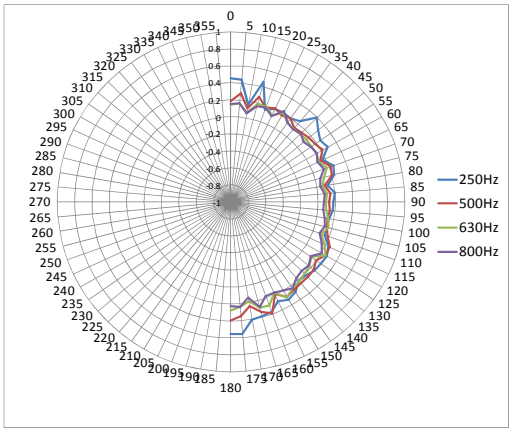
Los valores se calcularon para los 37 puntos de receptor y se graficaron en función del ángulo de recepción con respecto a la normal de referencia. Las graficas presentadas corresponden a las bandas de 1/3 de octava, para cada una de las dimensiones respectivamente.

Una vez se realizo la medición y se correlaciono los datos se obtuvieron las siguientes graficas.

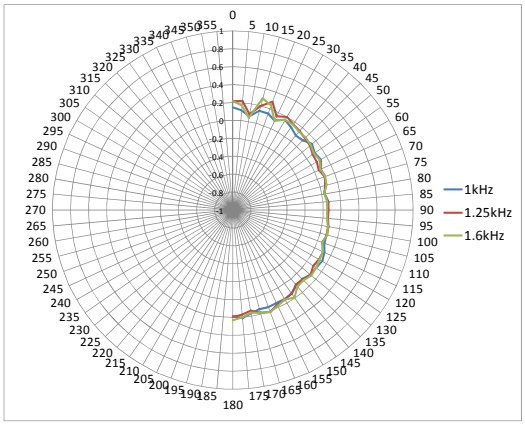
5.1 Diagramas polares de difusion.

5.1.1 Dimension 1.

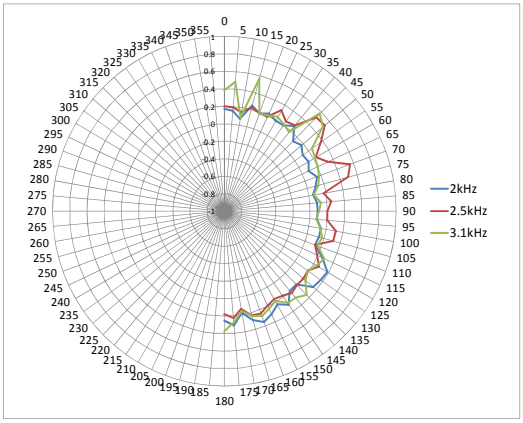
A Continuacion se presentan los diagramas polares de difusion del panel obtenidos para la dimension 1, a incidencia normal.



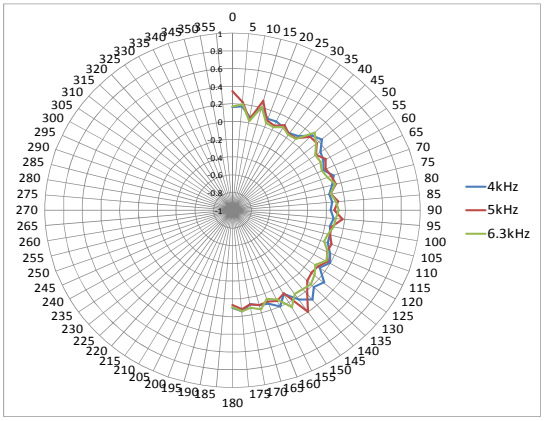
Grafica 1. Diagrama Polar de Difusión para 250, 500, 630 y 800Hz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal.



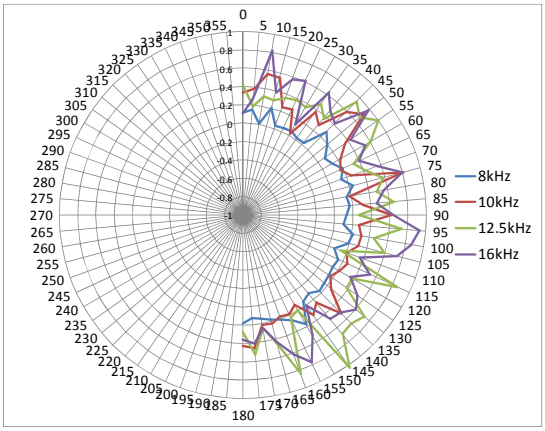
Grafica 2. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal.



Grafica 3. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal.



Grafica 4. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal.



Grafica 5. Diagrama Polar de Difusión 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y 16kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia normal.

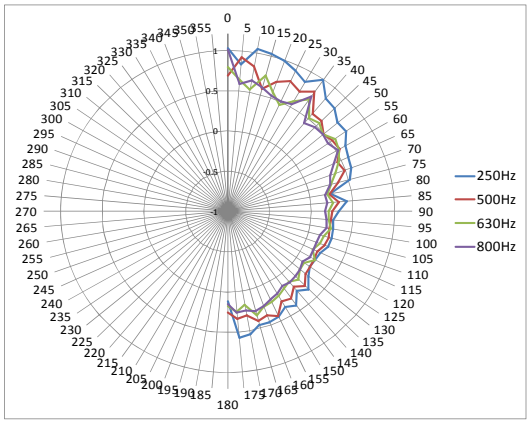
Aunque 250Hz no se encuentra en el rango del panel se procedió a correlacionar los datos en esta banda de octava para establecer si el difusor actúa o no fuera del rango para el cual fue calculado.

Las graficas polares arrojaron los siguientes resultados.

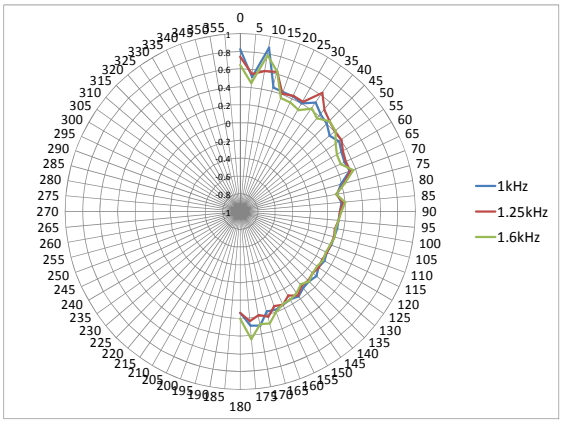
- En el diagrama polar de 250Hz se puede ver que existe un patrón de dispersión uniforme, que indica que la difusión también se efectúa en esas frecuencias.
- A medida que la frecuencia aumenta el nivel de energía reflejada disminuye, esto puede obedecer a la característica de absorcion del poliestireno. Puesto absorbe más a frecuencias altas que a bajas.

- En las bandas de 1 y 2kHz es donde mejor se pueden ver las 13 lobulaciones paras las cuales fue diseñada el difusor.
- En 10,12.5 y 16 kHz es donde se presenta una menor difusión uniforme.
- Como podemos observar en el grafico 5, en 2.5kHz y 3,1 kHz se presenta más concentración de energía entre 55 y 75 grados.

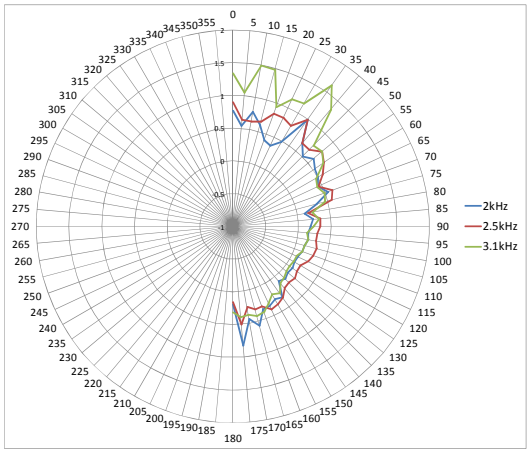
A continuación se presentan los diagramas polares de difusión medidos para la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria (125 grados).



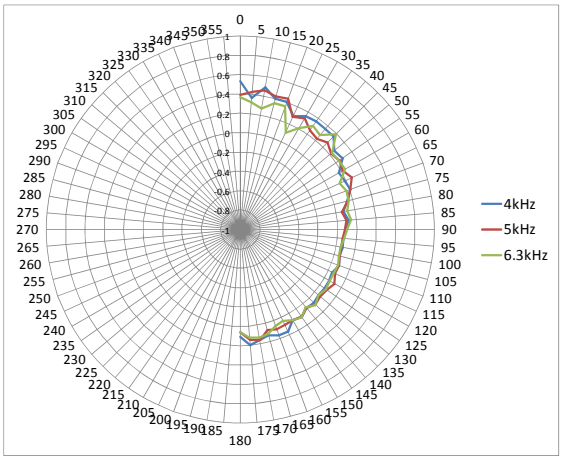
Grafica 6. Diagrama Polar de Difusión para 250Hz, 500Hz, 630Hz y 800Hz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria.



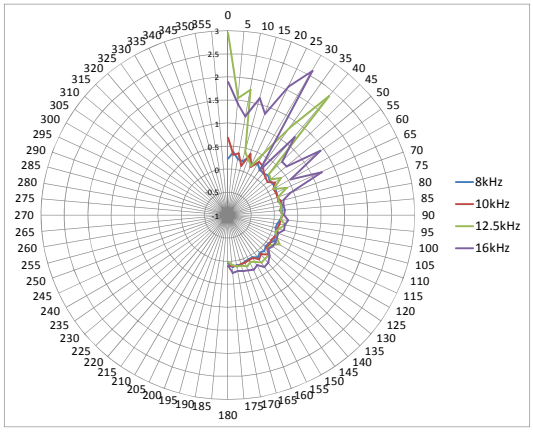
Grafica 7. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria.



Grafica 8. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria.



Grafica 9. Diagrama Polar de Difusión para 4kHz, 5kHz y 6.3kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria.

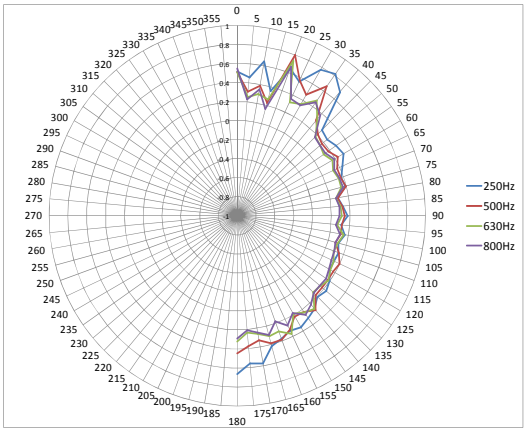


Grafica 10. Diagrama Polar de Difusión para 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y 16kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria.

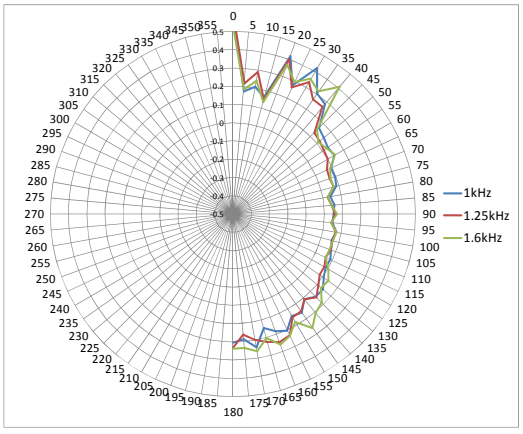
- En la incidencia aleatoria se observa que los gráficos en general de todas las frecuencias tienen cierta concentración de energía hacia el ángulo contrario de incidencia de la fuente.
- En 10kHz y 8kHz se observa una difusión uniforme.
- En 16 kHz la el patrón polar no es muy uniforme y la reflexión respecto a la incidencia es casi especular.

5.1.2 Dimensión 2

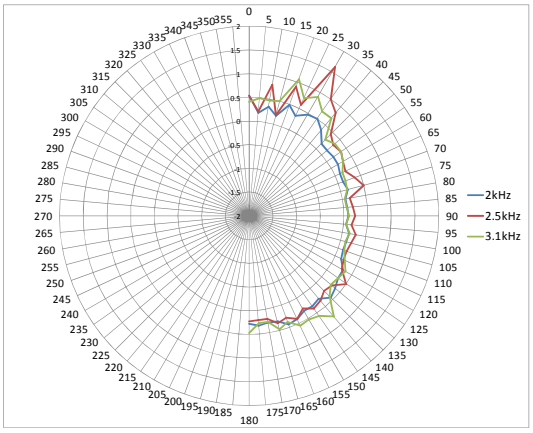
A continuación se presentan los diagramas polares de difusión obtenidos para la dimensión 2 a incidencia normal.



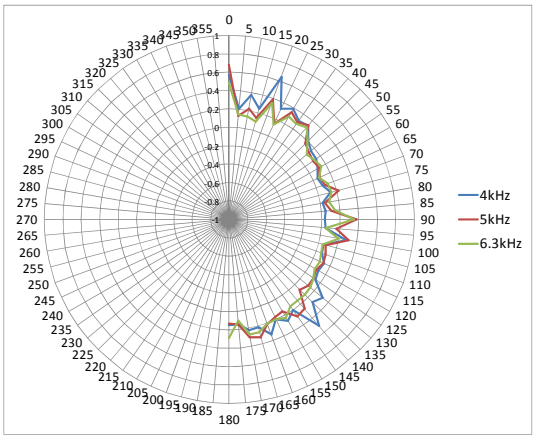
Grafica 11. Diagrama Polar de Difusión para 250Hz, 500Hz, 630Hz y 800Hz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal.



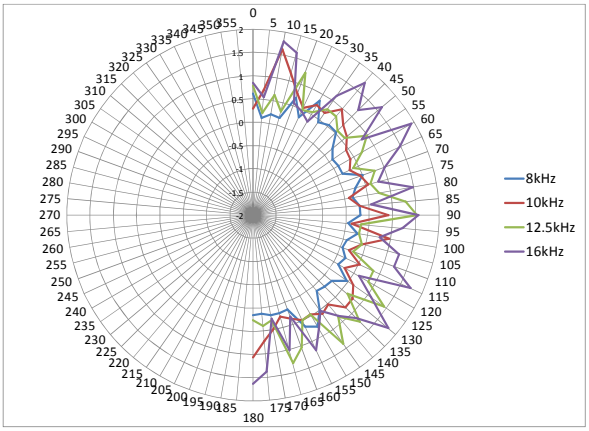
Grafica 12. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal.



Grafica 13. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal.



Grafica 14. Diagrama Polar de Difusión para 4kHz, 5kHz y 6.3kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal.



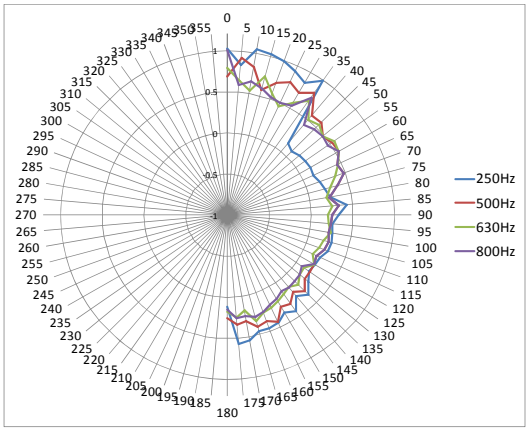
Grafica 15. Diagrama Polar de Difusión para 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y 16kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia normal.

De las anteriores graficas se puede decir.

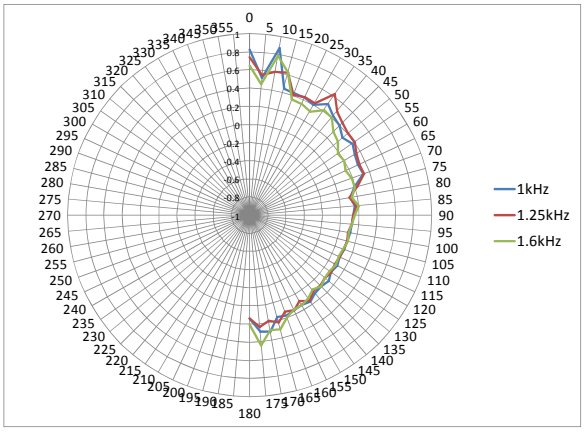
- Aunque si varían los diagramas polares con respectos a los de la primera dimensión, conservan las mismas características de difusión para las diferentes bandas, como era de esperarse ya que el difusor no varía en las dos diferentes dimensiones.
- Se puede ver que se conserva las mismas características de absorcion para frecuencias altas.
- También se genera difusión en 250Hz en esta dimensión.

- Se observa que en las bandas de frecuencias altas el patrón polar de dispersión es menos uniforme afectando directamente el coeficiente de difusión.

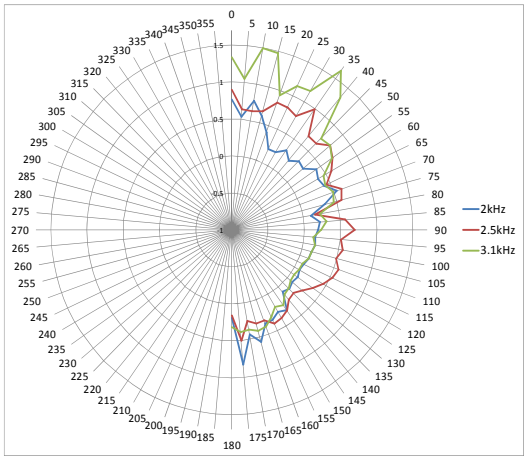
A continuación se presentas las graficas obtenidas para 125 grados (incidencia aleatoria) en la dimensión dos:



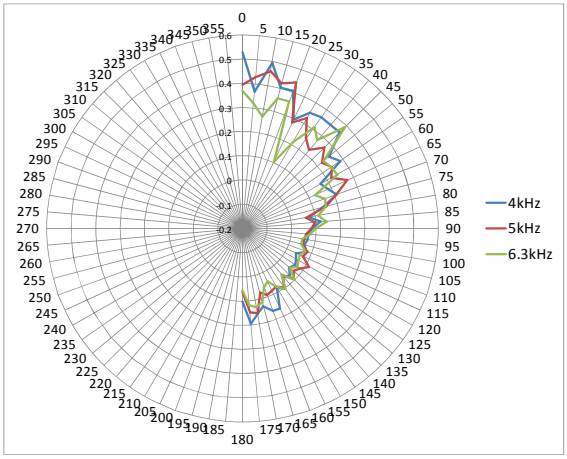
Grafica 16. Diagrama Polar de Difusión para 250Hz, 500Hz, 630Hz y 800Hz en la dimensión 2 del panel a incidencia aleatoria.



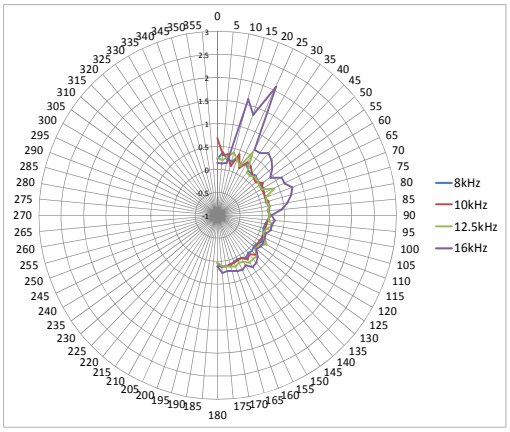
Grafica 17. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz en la dimensión 2 del panel a incidencia aleatoria.



Grafica 18. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria.



Grafica 19. Diagrama Polar de Difusión para 4kHz, 5kHz y 6.3kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria.



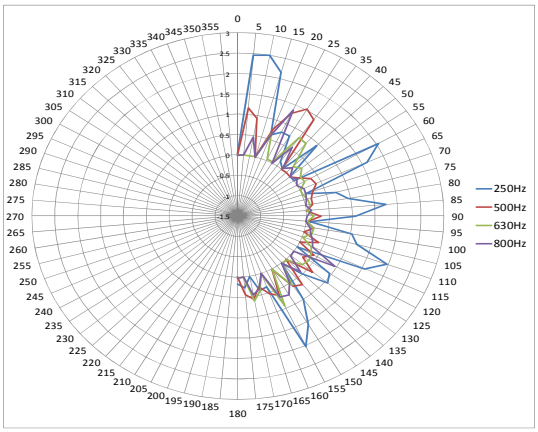
Grafica 20. Diagrama Polar de Difusión para 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y 16kHz en la dimensión 1 del panel a incidencia aleatoria.

De estas graficas podemos deducir:

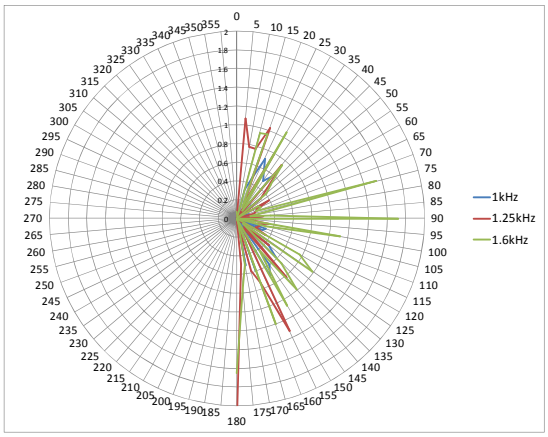
- Se puede observar que los diagramas polares para esta dimensión en incidencia aleatoria son un poco mas uniformes y no tienen tana reflexiones especulares que en la dimensión 1.
- En 16kHz si existe unas reflexiones muy especulares en el ángulo contrario de incidencia de la fuente.
- En frecuencias medias los diagramas polares son muy parecidos a los obtenidos en la dimensión 1.

5.1.3 Superficie plana.

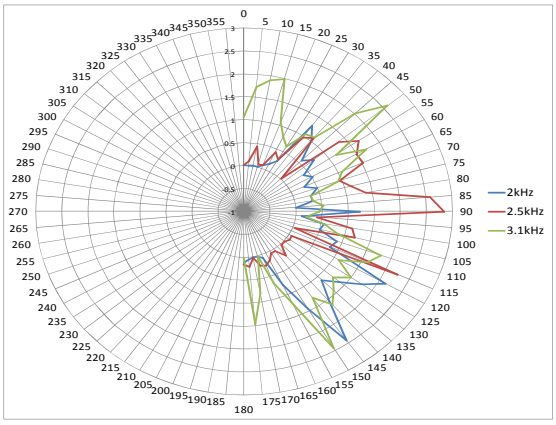
A continuación se muestran los patrones polares obtenidos para la superficie plana medida en incidencia normal.



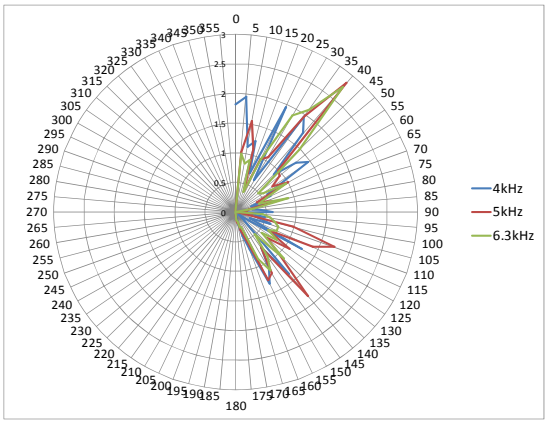
Grafica 21. Diagrama Polar de Difusión para 250, 500, 630 y 800Hz superficie plana a incidencia normal.



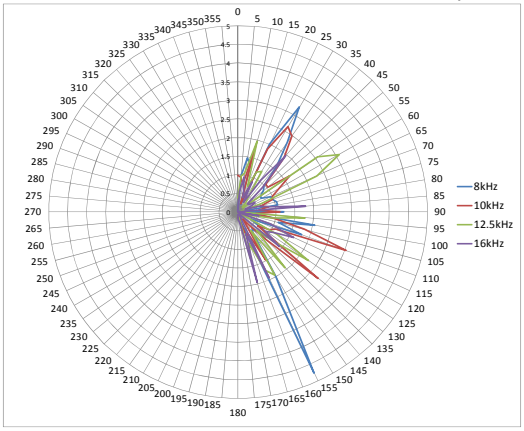
Grafica 22. Diagrama Polar de Difusión para 1kHz, 1.25kHz y 1.6kHz superficie plana a incidencia normal.



Grafica 23. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz superficie plana a incidencia normal.



Grafica 24. Diagrama Polar de Difusión para 2kHz, 2.5kHz y 3.1kHz superficie plana a incidencia normal.



Grafica 25. Diagrama Polar de Difusión 8kHz, 10kHz, 12.5kHz y superficie plana.

De los anteriores gráficos se obtuvieron los siguientes resultados.

- La reflexión especular de la superficie plana es claramente diferente de las reflexiones difusas.
- A frecuencias más bajas el patrón polar de la superficie plana tiende a ser más difuso, a pesar de esto, la reflexión del difusor supera en dispersión a la superficie plana.
- Los patrones polares del difusor constan de menos energía pero mucho más uniformes que los patrones de la superficie plana, esto se debe al re direccionamiento y distribución de la energía. Lo cual nos indica un mejor coeficiente de difusión.

5.2 Calculo de los coeficientes de difusión.

El coeficiente de difusión es un valor entre 0 y 1, que indica la uniformidad con que la energía sonora es dispersada en el espacio por una superficie. En este contexto una superficie difusora perfecta de coeficiente 1, será aquella que logre que en todas las posiciones de recepción se obtenga el mismo nivel de presión sonora reflejado.

5.2.1 Coeficientes de difusión direccionales (d). Los cálculos de estos coeficientes fueron realizados usando la ecuación incluida dentro del documento AES-4id-2001 en la que se remplazaron los valores de Li obtenidos anteriormente. Este valor indica la uniformidad de la difusión para una sola posición de fuente.

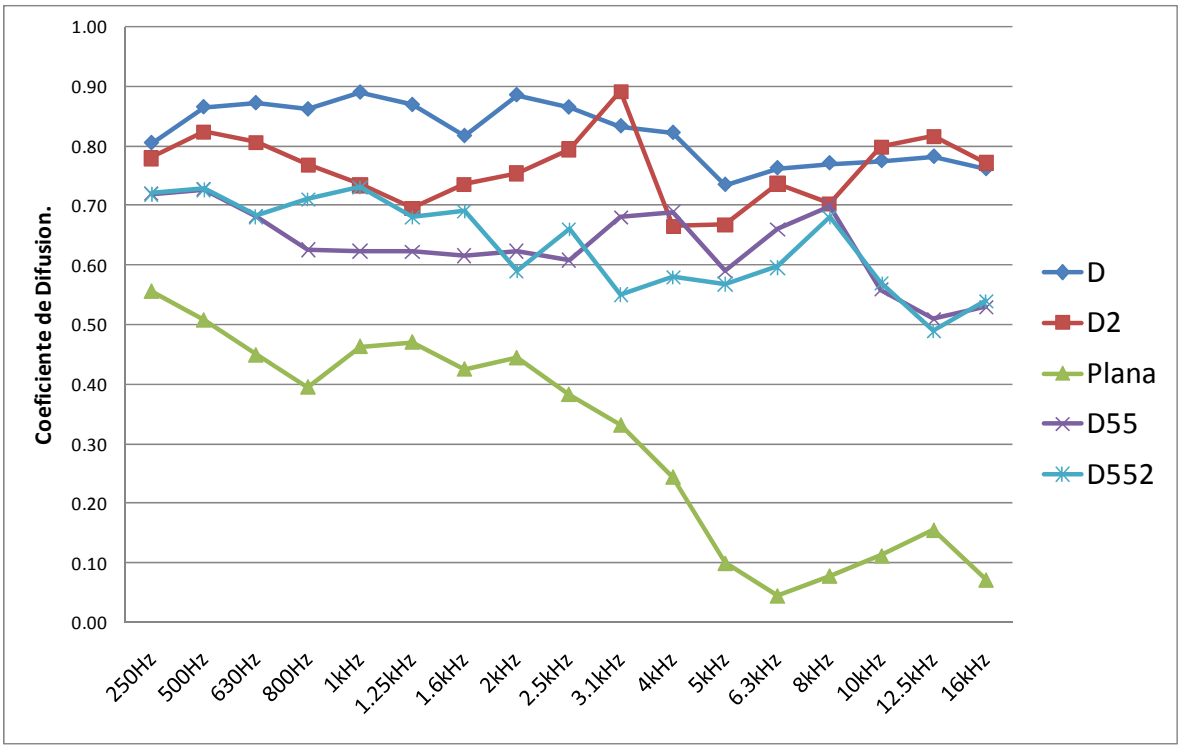
$$d = \frac{\left(\sum_{i=0}^{n} 10^{Li/10}\right)^2 - \sum_{i=0}^{n}\left(10^{Li/10}\right)^2}{(n-1)\ \sum_{i=0}^{n}(10^{Li/10})^2}$$

Los valores de d se calcularon para las diferentes posiciones de receptor, midiendo las dos dimensiones del difusor. En la tabla 7. Se relacionan los valores del coeficiente de difusión direccionales por tercio de octava.

Tabla No 7. Coeficientes de difusión direccional para las dos dimensiones.

	250Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz	2.5kHz	3.1kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz
D	0.80	0.86	0.87	0.86	0.89	0.87	0.82	0.88	0.86	0.83	0.82	0.73	0.76	0.77	0.77	0.78	0.76
D2	0.78	0.82	0.81	0.77	0.73	0.70	0.74	0.75	0.79	0.89	0.67	0.67	0.74	0.70	0.80	0.82	0.77
D55	0.72	0.73	0.68	0.63	0.62	0.62	0.62	0.62	0.61	0.68	0.69	0.59	0.66	0.70	0.56	0.51	0.53
D552	0.72	0.73	0.68	0.71	0.73	0.68	0.69	0.59	0.66	0.55	0.58	0.57	0.60	0.68	0.57	0.49	0.54
Plana	0.56	0.51	0.45	0.40	0.46	0.47	0.43	0.44	0.38	0.33	0.24	0.10	0.04	0.08	0.11	0.15	0.07

A continuación se grafica en función de la frecuencia.



Grafica 14. Coeficientes de difusión en 1/3 de octava para las dos dimensiones del panel y superficie plana.

Una superficie se considera Difusora si su coeficiente de difusión es mayor que 0.5, los valores obtenidos del coeficiente de difusión para las dos dimensiones superan en todas sus bandas.

- En las bandas de 4, 5 y 10kHz presentan un menor coeficiente de difusión en la dimensión 2.
- El coeficiente de difusión es similar en las dos dimensiones con variaciones mínimas en frecuencias medias altas.
- La dimensión 2D es la que presenta un coeficiente de difusión más lineal en el espectro de frecuencias.
- A incidencia aleatoria el coeficiente de difusión es menor pero no deja de ser difuso en comparación con una superficie plana

5.4 Reflectogramas.

Con fines demostrativos se analizaron dos respuestas al impulso en el programa Delta Dirac en versión de evaluación, las dos respuestas analizadas corresponden a dos puntos iguales. El primer punto para la superficie plana, y el mismo punto para el difusor en la dimensión 1. El punto analizado fue el 14 correspondiente al ángulo 70 grados de lo anterior podemos observar lo siguiente:

.

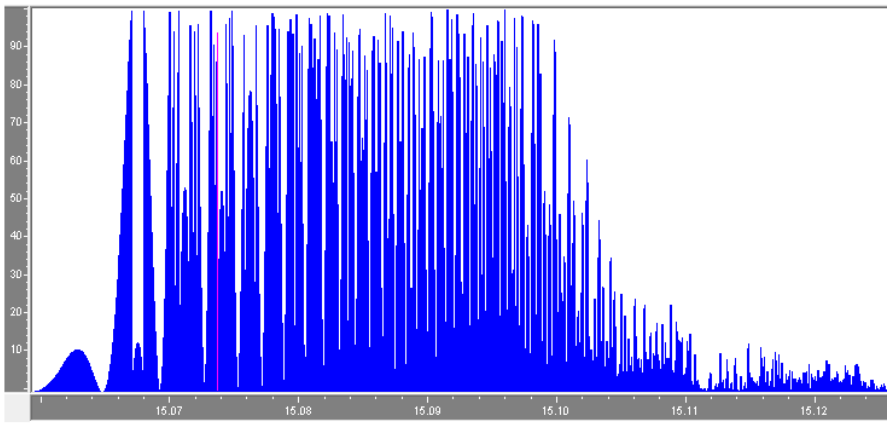


Figura 19. Reflectograma obtenido para superficie plana en 70 grados.

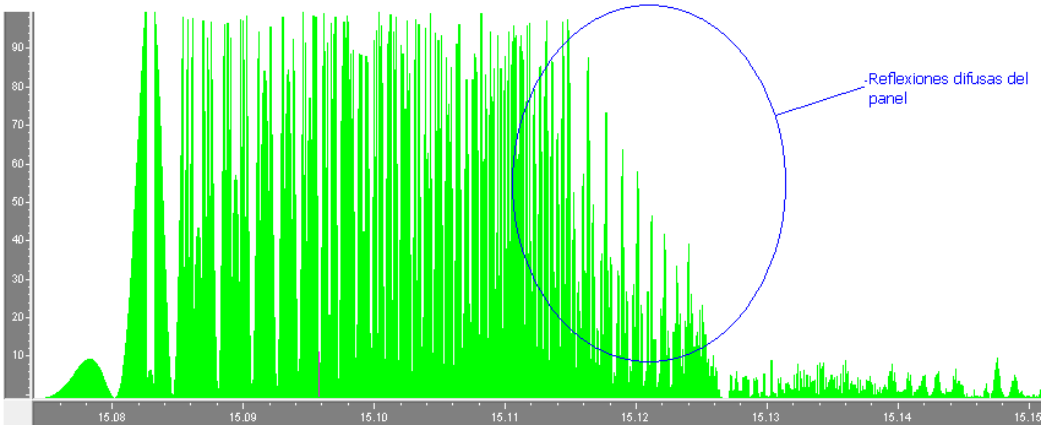


Figura 20. Reflectograma obtenido para superficie difusor en dimensión 1 en 70 grados.

- Se puede observar claramente que el panel en ese punto entrega mas reflexiones que la superficie plana.

6 CONCLUSIONES.

- Usando el concepto matemático de los fractales, la implementación de los difráctales y sus secuencias generadora. Se pueden diseñar unidades optimizadas de Difusión (paneles) bidimensionales que tengan un ancho de banda extendido, y puedan ser aplicados en cualquier recinto como unidades comerciales.

- El panel de difusión BD-0516, funciona como una superficie difusora de 500Hz a 16KHz y puede ser aplicado en cualquier recinto donde se necesite generar reflexiones difusas buscando mejorar la imagen sonora, inteligibilidad, crear un campo homogéneo y reducir distorsión acústica.

- Se hace necesario buscar una forma de fabricación, más práctica que la empleada en la construcción del BD – 0516 ya que la forma artesanal como fue construido se torna muy tediosa y muy demorada lo que limita la producción en masa de dicho panel.

- La programación de libros electrónicos en Exel facilitan enormemente la correlación de datos en la caracterización del patrón polar y coeficiente de difusión de un difusor.

- El material escogido, poliestireno expandido de alta densidad, demostró ser un material muy versátil tanto en manejabilidad para su corte, como en sus características físicas como absorcion, densidad y fungibilidad.

- El panel fabricado se comporta como una superficie difusora ya que en ninguna dimensión e incidencia de fuente se encontró un coeficiente de difusión menor a 0.5.

- A incidencia aleatoria el coeficiente de difusión se ve afectado por la reflexión especular que hay en el ángulo contrario de incidencia de la fuente lo que permite afirmar que el difusor

actúa al 100 por ciento a incidencia normal de fuente mas sin embargo nunca deja de comportarse como superficie difusora.

- Se comprobó que a frecuencias más bajas es mayor la difusión, hasta en una superficie plana.

- La dimensión 1 del panel es la más optima para ser aplicada paralelamente a los receptores (oídos, micrófonos) ya que es la que presenta patrones polares mas uniformes en las diferentes bandas y por ende tiene un coeficiente de difusión más elevado.

- Los diagramas polares en bandas de frecuencias altas son menos uniforme por lo tanto el coeficiente de difusión del panel se ve afectado en frecuencias altas.

- El coeficiente de difusión de una superficie plana del mismo material y mismas dimensiones es mucho menor que el de cualquier dimensión del panel, probando asi que la teoría y el diseño de las cavidades y dimensiones del difusor sirve para re direccionar la energía.

- El difusor no presenta problemas de corte en frecuencias de diseño, mantiene el campo difuso en el rango útil para el cual fue diseñado.

- Los diagramas polares de dispersión son dependientes de uniformidad según la escala que se utilice en ellos. convirtiéndose en un manejo de escala presentar diagramas uniformes o no, impidiendo evaluar el verdadero comportamiento de un difusor, para esta medición se procuro manejar la misma escala en las diferentes graficas.

- El concepto de los difráctales si permite diseñar un difusores de un ancho de banda extendido.

- Como se observo en el reflectograma es claro que el difusor entrega mas reflexiones que una superficie plana.

7 RECOMENDACIONES.

- La elección del material debe hacerse teniendo en cuenta sus características físicas como densidad, fungibilidad, y coeficiente de absorcion encontrando un equilibrio inteligente entre estos, ya que estos parámetros pueden llegar a ser un problema tanto en la instalación en recintos como en el comportamiento del difusor.

- Ya que la dimensión 1 del BD – 0516 tiene un coeficiente de difusión un poco más elevado que la dimensión 2, se recomienda instalar el difusor con la dimensión 2 paralela a los receptores (oídos humanos, micrófonos).

- No se recomiendo caracterizar coeficientes de difusión y patrones polares con modelos a escala y materiales de los cuales no se conocen sus propiedades acústicas.

- No utilizar telas ni paños o cualquier otro tipo de superficie sobre el panel ya que estas pueden alterar su comportamiento de difusión.

- También es muy importante recalcar que los difusores QRD numéricos no son los únicos que existen, actualmente se están desarrollando difusores de tipo axiales, y secuencias bidimensionales en versiones difráctales para PRD sería muy bueno evaluar el comportamiento de varios difusores en el laboratorio.

- Se hace una recomendación especial a la AES, de incluir en la presentación de resultados de los patrones polares de dispersión sonora, una escala de 0 hasta la máxima magnitud obtenida en su documento de recomendación 4id-2001, Ya que un manejo conveniente de la escala puede variar la uniformidad del grafico y no permite observar bien el comportamiento de la superficie estudiada.

BIBLIOGRAFÍA.

- Arau – Puchades, H. (1999). ABC de la Acústica arquitectónica. Ed. Ceac, S.A.
- Malcolm Crocker, “Handbook of Acoustics”.
- M.R. Schroeder. " Diffuse sound reflection by maximum lenght sequences". J.A.S.A, vol 57, pp. 149-151 (1975).
- Peter D’Antonio y John H. Konnert. " The reflection phase grating diffusor: Design theory and application ". J. Audio. Eng. Soc, vol. 32, nº 4, pp. 228-238 (1984).
- Peter D’Antonio y John H. Konnert. " The QRD diffractal: A new one or 2-D fractal sound diffusor". J. Audio. Eng. Soc. Vol 40, nº 3, pp. 117-128 (1992)
- Alejandro Velasco Salvador. Estudio del método para la caracterización de difusores particularizado a estructuras unidimensionales, Dispositivos de sistemas Acústicos y Ópticos.
- Susana Torregrosa. Estudio de la difusividad de un campo Acústico, Tecniacustica de Gandía.
- Ing. Alejandro Bidondo .Difusores acústicos I.
- Ing. Alejandro Bidondo. Difusores acústicos II.
- Ing. Alejandro Bidondo. Difusores acústicos III.
- Pons Pico José. Caracterización de un Difusor con simetría axial, Dispositivos de sistemas Acústicos y Ópticos.
- Difusión, absorción y acondicionamiento acústico, Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Ingeniería de Sonido.
- Estudio y diseño de difusores unidimensionales QRD – apéndice 1, UPC editions.
- Ing. Alejandro Bidondo. Difusores Acústicos – presentación formal, Ingeniería De Sonido
- Ing. Alejandro Bidondo. Difusor acústico numérico obetha 1.
- Enrique Orduña Malea. Caracterización y estudio de difusores R.P.G.

GLOSARIO.

Absorción: en acústica, la energía de las ondas sonoras- que entra en la superficie de cualquier material en lugar de que rebote o se reflecte. Los materiales se clasifican en función de su capacidad para absorber el ruido.

Acústica: parte de la física que trata de la formación y difusión de los sonidos.

Banda de octava: la gama de frecuencia auditiva generalmente se separa en bandas de octava por conveniencia, en donde cada banda específica se representa por su frecuencia de centro, a saber: 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1KHz, 2 KHz, 4 KHz, 8 KHz, y 16 KHz, que cubre la mayoría de la gama de las frecuencias audibles.

Cavidad: hueco que se abre dentro de un cuerpo o en su superficie.

Difusión: extensión, dilatación, aumento del espacio que ocupa algo.

Difusor: material que debido a su superficie se encarga de dispersar el sonido.

Hendidura: abertura o corte profundo en un cuerpo sólido que no llega a dividirlo del todo.

Imagen sonora: es la imagen mental subjetiva que a cada persona le sobreviene ante un estímulo sonoro.

Inteligibilidad: nivel de entendimiento de palabras.

Lóbulo: cada una de las partes, a manera de ondas, que sobresalen en el borde de una cosa.

Onda: perturbación que se propaga.

Patrón polar: la representación gráfica del cubrimiento de un dispositivo emisor o receptor.

PRD: difusor de raíces primitivas.

QRD: difusor de residuos cuadráticos.

Sonómetro: instrumento de medición encargado de medir sonido y vibraciones.

ANEXO A.

The QRD Diffractal: A New 1- or 2- Dimensional Fractal Sound Diffusor

Preprint# 2938
Session-Paper# A-3

Peter D'Antonio and John Konnert
RPG Diffusor Systems, Inc.
Largo, MD USA

Presented at the 89th Convention 1990 September 21–25 Los Angeles



AES

This preprint has been reproduced from the author's advance manuscript, without editing, corrections or consideration by the Review Board. The AES takes no responsibility for the contents.

Additional preprints may be obtained by sending request and remittance to the Audio Engineering Society, 60 East 42nd Street, New York, New York 10165 USA.

All rights reserved. Reproduction of this preprint, or any portion thereof, is not permitted without direct permission from the Journal of the Audio Engineering Society.

AN AUDIO ENGINEERING SOCIETY PREPRINT

The QRD® DIFFRACTAL™: A New 1 or 2-Dimensional Fractal Sound Diffusor

Dr. Peter D'Antonio & Dr. John Konnert
RPG Diffusor Systems, Inc.
12003 Wimbleton Street
Largo, MD 20772

ABSTRACT

Number theoretic diffusors, as described by Manfred Schroeder, are characterized by a periodic grouping of a series of wells of equal width, but different depths, separated by thin dividers. Over the past seven years we have found the quadratic residue depth sequence very useful in hundreds of applications, including recording studios, concert halls, worship spaces, conference rooms, music education and even home listening rooms. The frequency bandwidth is determined principally by the depth of the deepest well, which determines the low frequency limit, and the well width, which determines the upper limit. Physical manufacturing constraints pose a limitation of approximate 1" on the well width and approximately 16" on the depth, after which the units become diaphragmatic and defeat the purpose of increasing the depth further. To extend the low frequency range and bandwidth of the QRD®, we have developed a fractal diffusor, the DIFFRACTAL™, which is in effect a diffusor within a diffusor, each covering a different frequency range, much like a multi-way loudspeaker. The full spectrum bandwidth and cross-over points are completely calculable. The mid-high frequency diffusors are placed on the wells of a dedicated stiff and massive low frequency diffusor. These bandlimited nested diffusors allow virtually any bandwidth, limited only by the available depth and the surface detail, and aesthetic design. We will describe two applications of the DIFFRACTAL™ at Peter Gabriel's Real World Studios, Bath, England and INXS' Rhinoceros Recording Studios, Sydney, Australia. We will also describe a two dimensional DIFFRACTAL™ capable of providing even further low frequency control.

[1] QRD® DIFFUSOR REVIEW

The acoustical analog of the diffraction grating, which has played an important part in spectroscopy for over 100 years, was not used in architectural acoustics until the discovery [1] and development [2-48] of the reflection-phase grating diffusor (RPG™), within the past decade. The one-dimensional (1-D) RPG, Fig. 1 & 2, consists of a linear periodic grouping of an array of wells of equal width, but different depths, separated by thin dividers. A diffusor based on a quadratic residue number theory sequence is called a QRD® DIFFUSOR. The RPG can also be designed in a two-dimensional (2-D) realization [1,2], Fig. 3. A 2-D diffusor based on a quadratic residue sequence is called a QRD® OMNIFFUSOR™ and consists of a 2-D array of square, rectangular or circular wells of varying depths, separated by thin dividers. Fig. 4 and 5 show a "male" embodiment of the OMNIFFUSOR™ without cell dividers. It can be seen that the

$$d_{h,k} = \{h^2+k^2\}_{\mathrm{mod}N} \frac{\lambda}{2N} \tag{4}$$

The RPG behaves like an ideal diffusor in that the surface irregularities provide excellent time distribution of the backscattered sound and uniform wide-angle coverage over a broad designable frequency bandwidth, independent of the angle of incidence.

The 2-D polar response or diffraction orders (m,n), Eq. 5, can be conveniently displayed in a reciprocal lattice reflection phase grating (RLRPG) plot, shown in Fig. 10. The diffraction orders are determined by the constructive interference condition:

$$\sqrt{m^2+n^2} = NW\frac{\sin\alpha_d + \sin\alpha_i}{\lambda} \tag{5}$$

When the depth variations are defined by a quadratic residue sequence, the non-evanescent scattering lobes are represented as equal energy contours within a circle whose radius is equal to the non-dimensional quantity, NW/λ. This is a convenient plot because the effects of changing the frequency can easily be seen. Thus if λ_2 is decreased to λ_1, the number of accessible diffraction lobes contained within the circle of radius NW/λ_1 increases, thereby also increasing the diffusion. A 1-D RPG with horizontal wells will scatter in directions represented by a vertical line in the RLRPG (with n=0, ±1, ±2, etc. and m=0) and diffraction from a 1-D RPG with vertical wells will occur along a horizontal line (with m=0, ±1, ±2, etc. and n=0). In an actual application in a room, the diffraction directions from a divergent source and additional room boundary secondary sources, can be made to approximate this 2-D diffraction pattern by using a cluster of 1-D RPGs with both vertical and horizontal well orientations. A coordinate on the RLRPG plot is a direction. These scattering directions can be seen in the 3-D "banana" plot of Fig. 11, where the nine diffraction orders occurring within a circle of radius NW/λ_2 are plotted, from a diagonal view perspective (arrow lower left). A conventional polar pattern for a 1-D RPG with vertical wells at λ_2 is obtained from a planar slice through lobes 0, 2 and 6 in Fig. 10 and would contain orders with m=0 and ±1. The breath of the scattering lobes is proportional to the number of periods contained in the RPG. Thus in the limit of an infinite plane, the scattering lobes would be delta functions. In practice, the use of a finite number of periods, near-field conditions and the critical bandwidth sensitivity of the auditory system combine to minimize lobing effects.

[3] 2-D OR NOT 2-D THAT IS THE QUESTION

Let's review the properties of the 1-D and 2-D QRD® to help determine which surface will best

suit a particular application. The 1-D QRD® backscatters sound into a hemidisk, which can conveniently be directed by orienting the diffusor or the source, Fig. 12. The far-field steady-state energy is proportional to 1/N, where N is the number of wells in a repeat unit. The 2-D QRD® OMNIFFUSOR™ backscatters sound into a hemisphere and the steady-state energy is proportional to $1/N^2$. The steady-state energy at an observation point within the coverage area of a 2-D QRD® would be half (in Db) of that observed in the coverage area of a 1-D QRD®. The omnidirectional coverage pattern of the 2-D OMNIFFUSOR™ is less controllable than the hemidisk of the 1-D diffusor.

We have found that in critical listening and performance environments the most effective procedure to obtain controllable diffuse energy of appropriately useful level is with oriented 1-D QRDs. 2-D QRDs are useful in these spaces for low frequency control taking advantage of the omnidirectional coverage and the $1/N^2$ attenuation. Mid-high frequency broad-bandwidth 2-D OMNIFFUSOR™ are also useful in any application where attenuated diffuse sound or diffusive control of high sound pressure levels is desired. Uses include rehearsal spaces, music education band rooms, and recording studios.

Schroeder [1] has suggested many additional number-theory sequences which can be used to design RPGs. For example, the primitive root sequence suppresses the zero order and the Zech logarithm suppress the zero and first diffraction orders, at the design frequency and integer multiples thereof. While these surfaces are useful for monochromatic reflection control, experimental measurements using broad-bandwidth sound sources indicate that these surfaces do not offer any advantages over the QRD® sequences. In our acoustic applications, where critical bandwidth can be approximated by a 1/3-octave band, the beneficial selective order suppression is obscured by frequencies in the band not equal to the design frequency and its multiples.

The RPG represents an essential acoustical building block which was formerly unavailable. Consequently, it is having a profound influence on architectural acoustics and is finding widespread application in hundreds of installations around the world.

[4] EXTENDING QRD® LOW FREQUENCY PERFORMANCE

Recently more stringent design specifications in recording, performing and educational facilities have required extending the low frequency performance of the QRD®.

[4.1] THE QRDX™- A NEW DIFFUSOR WITH EXTENDED BASS RESPONSE

Since the low frequency performance is directly proportional to the depth of the diffusor and the high frequency response is inversely proportional to the well width, the first approach was obviously to design a diffusor with many deep narrow wells, as in our first design the QRD®-4311 with 43 1.1" wells, with a maximum depth of approximately 16". It was discovered that there is an inherent decrease in bass efficiency in the QRD® sequences themselves. The depth of a particular well is given by Eqs. 3 and 4. It can be seen that the maximum depth well is directly proportional to S_h/N times $(\lambda/2)$, where S_h is the maximum sequence value (h^2 modulo N) and N is the prime the sequence is based on. As one tries to increase the diffusion by

increasing N, the maximum prime number in the series, S_h approaches N and the ratio S_h/N, the ordinate in Fig. 13, approaches 1. As S_h/N approaches 1 the maximum depth approaches $\lambda/2$. It is desirable to derive sequences for which S_h/N is as small as possible thus reducing the maximum depth proportionately. We have derived a new QRD® sequence, which is called QRDX™, for eXtended bass, for which the half-wavelength multiplier has a lower and more uniform monatonic rise than a QRD®. It was also comforting to find a very favorable drop for N=13 for the QRDX™ sequence. Thus we can double the diffusion over an N=7 and obtain approximately the same bass efficiency.

[4.1] THE LFD™- A DEDICATED LOW FREQUENCY DIFFUSOR

Another attempt to provide low frequency performance was to utilize two physically separate diffusors. A high-mid frequency diffusor (HFD) was placed in front of a dedicated low frequency diffusor (LFD™). Long wavelengths would diffract around the HFD and intercept the LFD™ which was placed physically behind it. Three construction photos of an installation at Welk Music, Nashville, TN, by Bob Todrank, are shown in Fig. 14. Fig. 14a shows the LFD™, Fig. 14b shows the LFD™ covered with spray fiberglass with the framework for the HFD and Fig. 14c shows the completed installation with transparent fabric surrounding the HFD and providing sonic access to the LFD™.

In an attempt to combine the HFD and LFD into a single elegant and aesthetic full spectrum structure we turned our attention to a new topic which is finding application in almost all fields of science- the fractal.

[5] FRACTALS

There are numerous natural phenomena which exhibit a macroscopic property or shape which is repeated microscopically at progressively smaller and smaller scales. At each level of magnification we find a scaled replica of the original. These scaled replicas are self-similar, that is, they differ only in scale and one can say that they possess the property of self-similarity or invariance to scaling. These complex surfaces which consist of co-existing nested self-similar scaled replicas are fractals. A fractal looks the same at any magnification. There is no simple definition of a fractal, but all attempts at a simple definition incorporate the idea that the whole is made up of parts similar to the whole in some way. The term fractal was coined by Benoit B. Mandelbrot and the essence of his ideas are contained in his book "The Fractal Geometry of Nature" [49]. Jens Feder has also contributed a very useful book on this subject called "Fractals" [50]. Thus in understanding fractals we are forced to contemplate the concept of self-similarity or invariance to changes in scale or size.

[5.1] SYMMETRY: THE INVARIANCE TO CHANGE

The concept of invariance is very common in nature. Symmetry is invariance against change. A circle is invariant to any rotation about its center. A square is invariant to a rotation of any multiple of 90°. A square possesses 4-fold rotational symmetry. We are all familiar with the mirror symmetry of our left and right hands when joined at the thumbs. All of the possible combinations of rotations and reflections about a point have been classified into the 32 point

[5.2] SELF-SIMILARITY: THE INVARIANCE TO SCALING

An infinite straight line is invariant to translation and scaling and is self-similar. There are many simple nonlinear deterministic systems which behave in an apparently unpredictable and chaotic manner. These problems with chaotic solutions are being addressed by the field of chaotic dynamics of dissipative systems. In many such situations the only property which provides a handle on interpretation is self-similarity. Phase space is the set of variables that specify the state of the system. The phase space of a room, for example, describes the energy versus frequency at every instant of time. If one considers a system and its phase space, then the initial conditions may be attracted to some subset of the phase space (the attractor) at some time. For example, for a damped harmonic oscillator the attractor is the point at rest. Attractors can be a point, which is set with dimension zero, a closed curve with dimension 1, or the attracting set can be much more irregular and in fact have a dimension that is not an integer. Such sets are called fractal and when they are attractors, they are called strange attractors. Strange attractors can also be chaotic. By this term we mean that if we take two typical points on the attractor that are separated from each other by a small distance, then as time progresses they move apart exponentially fast. Thus a small uncertainty in the initial state of the system leads to inability to forecast its future. In Manfred Schroeder's fascinating new book [51] many chaotic systems are explored and explained. One simple one, which can be tried at home, is the chaotic motion of a magnetic pendulum with three stable resting points. "The pendulum consists of a string from which a small magnet is suspended. The three centers of attraction are realized by three magnets over which the suspended little magnet can freely swing without touching them. If the pendulum is started from any initial condition with a large enough deflection or energy, it is generally impossible to say above which of the three magnets the pendulum will finally come to rest. In other words the "basins of attraction" of the three magnets are intricately intertwined. [51]"

With all of this impending chaos it is quite comforting to me that the nineteenth century English eccentric Sir Francis Galton once observed "I know of scarcely anything so apt to impress the imagination as the wonderful form of cosmic order expressed by the law of frequency of error". It reigns with supreme serenity and in complete self-effacement amidst the wildest confusion. The more chaotic the phenomenon, be it test grades, dice throws, weight, height, etc., the more perfect is the distribution. It is the supreme law of unreason. Whenever a large sample of chaotic elements are taken in hand and organized in the order of their magnitude, an unsuspected and most beautiful form of regularity proves to have been latent all along [52].

[5.3] THE FRACTAL DIMENSION- D

Mandelbrot posed the question "How Long is the Coast of Britain"? It is evident that its length is at least equal to the distance measured along a straight line between its beginning and its end. A typical coastline is irregular and the question is, how much longer? Well it depends on the "yardstick" or measure interval, δ. As δ gets smaller the number of steps or intervals, $N(\delta)$, increases as well as the length of the coastline, $L(\delta)=\delta N(\delta)$. I could not find a digitized map of Great Britain, but keeping in Mandelbrotian tradition Feder asked the question "How Long is

the Coast of Norway?" and provided a digitized map of the southern coast of Norway containing 1800x1200 pixels (Fig. 16). The square grid has a spacing δ= 50 Km. It can be seen in Fig. 16-(left) that the length of a coastline shows no sign of reaching a constant value as δ is reduced. In fact a straight line is obtained when the $\log_{10} \delta$ is plotted versus $\log_{10} L(\delta)$. The measured length is nicely approximated by the equation $L(\delta) = a\delta^{1-D}$, Eq. 6. The log-log plot, Eq. 7 in Fig. 16-left, indicates that most irregular coastlines have a slope, 1-D, which is non-zero. D is the fractal dimension and D = 1.3 for Great Britain.

$$L(\delta) = a\delta^{1-D} \tag{6}$$

$$\ln L(\delta) = (1-D)\ln(\delta) + \ln a \tag{7}$$

$$D = \lim_{\delta \to 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln(1/\delta)} \tag{8}$$

It is interesting that a circle, also shown in Fig. 16-left, has a slope of zero as δ approaches zero, yielding a value of D=1 since a circle is not a fractal. Thus a log-log plot of surface length versus δ approaches zero for a standard curve and approaches a constant for a fractal. Eq. 7 illustrates the straight line relation where ln L(δ) is the ordinate, ln (δ) is the abscissa, (1-D) is the slope and ln a is the intercept.

Standard Curve: (1-D) → 0 as $\delta \to 0$

Fractal Curve: (1-D) → constant as $\delta \to 0$

Mandelbrot initially described a fractal as a set for which the Hausdorff-Besicovitch dimension, D, exceeds the topological dimension. The topological dimension for a line is 1, a plane is 2 and a sphere is 3. While the coast of Great Britain exceeds the topological dimension of 1, we will see in a discussion of Cantor sets that fractal surfaces also exist with D less than one. A good way to learn about fractals is to construct them. A very elegant and easy construct is the Triadic Koch curve which is a standard example used to show that a curve may have a fractal dimension

$D > 1$. We will be using an initiator and a generator curve. The initiator or starting curve, n=0 Fig. 17, is a line segment of unit length L(1)=1. The generator, n=1 Fig. 17, consists of N(1/3) = 4 line segments of length δ=1/3 with a length L(1/3) = 4/3. We begin the construction by replacing each segment of the initiator by the generator yielding n=1. The next generation is obtained by replacing each line segment in n=1 with a scaled-down version of the generator yielding n=2. Thus in the second generation we have a curve consisting of $N(1/9) = 4^2 = 16$ segments each having length $\delta=3^{-2}=1/9$ and the length of the curve is $L(1/9) = (4/3)^2 = 16/9$. By applying a reduce generator to all segments of a previous generation of the curve a new generation is obtained. Such a curve is called a prefractal.

A little algebra yields an expression for the fractal dimension, D Eq. 8, in terms of the interval, δ, and the number of segments, $N(\delta)$, which replace the initiator in the limit where δ approaches zero. The Triadiac Koch curve has a D=1.2618 because the initiator of unit length is replaced with 4 segments, N(1/3)=4, of interval δ=1/3 (D=ln4/ln3). Fig. 18 shows how the Quadric Koch curve is obtained from a square initiator and a step function generator. Each of the four segments of the initiator are replaced by the N(1/4)=8 segments of the generator with an interval δ=1/4. Thus the fractal dimension D=1.5 (ln8/ln4). A fractal set with D=0.6309 is obtained from the Triadic Contor set construction in Fig. 19. The initiator of unit length is replaced by three segments of interval 1/3, except the central segment is discarded. Thus N(1/3)=2 and δ=1/3, yielding D=ln2/ln3=0.6309.

[6] DIFFRACTAL™

With this background in mind, we can now address the question of how to nest or combine an HFD and LFD. We begin with a straight line initiator of unit length in Fig. 20. The generator in this case is the 1-D QRD® diffusor we have come to know and love, for the moment without the dividers. The initiator is thus replaced with N(1/8)=20 segments, which are 1/8 of the length of the initiator, δ=1/8. Thus the fractal dimension D = ln20/ln8 = 1.4406. We have named this surface a DIFFRACTAL™ and close examination of the DIFFRACTAL™ reveals that we are essentially dealing with a diffusor within a diffusor within a diffusor. Each scaled replica can be used to scatter a particular band of frequencies. What we have in fact generated is analogous to a crossed-over multi-way loudspeaker, where each transducer or diffusor covers a particular frequency range. Getting back to the real world, let's make use of this concept of a diffusor within a diffusor and construct the RPG DIFFRACTAL® (U.S Utility Patent Serial No. 07/431,834) shown in Fig. 21. It can be seen that each generation is obtained by replacing the wells, segments between vertical dividers which remain unchanged, of a previous generation with a scaled replica of the QRD® from that generation. The invariance to scaling is apparent because looking at the third generation well width, with a window equal to that well width, reveals the second generation. Looking at a well width in the second generation, with a window equal to this well width, reveals the first generation and so on.

In practice we have gone to the second generation. The larger superstructure of the first generation acts as the LFD™ and the scaled replica of the first generation acts as the HFD. The two diffusors are essentially orthogonal or independent in performance, because low frequency

wavelengths are unaware of the surface irregularity of the HFD and the quadratic phase changes introduced by the LFD do not affect the polar distribution of the HFD. This can be seen in Fig. 22, where the polar pattern for the HFD is shown at the design frequency of the HFD when the diffusors form the customary reference plane (Fig. 22-top) and when they are imbedded into the LFD forming the DIFFRACTAL™, Fig. 22-bottom. The phases introduced by the LFD are also quadratic residues and hence when they sum with the HFD phases, the result is still a quadratic residue, whose Fourier transform of the exponentiated depths (phases) is still constant. This is a very useful outcome, because we can construct nested diffusors covering overlapping frequency bandwidths. The design equations for the 1-D QRD® DIFFRACTAL™ and the 2-D QRD® DIFFRACTAL™ are shown in Eq. 9 and Eq. 10, respectively.

$$d_h = [h/N]^2_{\mathrm{mod}M} \frac{\lambda_M}{2M} + (h_{\mathrm{mod}M})^2_{\mathrm{mod}N} \frac{\lambda_N}{2N} \tag{9}$$

$$d_{h,k} = \{[h/N]^2 + [k/N]^2\}_{\mathrm{mod}M} \frac{\lambda_M}{2M} + \{(h_{\mathrm{mod}M})^2_{\mathrm{mod}N} + (k_{\mathrm{mod}M})^2_{\mathrm{mod}N}\} \frac{\lambda_N}{2N} \tag{10}$$

M= prime number of LFD
N= prime number of HFD
h and h,k= DIFFRACTAL™ well number
λ_M= design wavelength of LFD
λ_N= design wavelength of HFD
d_h= total depth of well number h
[h/N]= truncate h/N e.g. [13/7]=1

The DIFFRACTAL™ can also be designed in a 2-D format. Fig. 23 shows a 2-D OMNIFFUSOR™ LFD™. The dot density reflects the depth of the respective wells with the deepest wells having the highest dot density. If these LFD™ cells are filled with scaled OMNIFFUSOR™ replicas, as in a single quadrant shown in Fig. 24, we form a 2-D DIFFRACTAL™.

[7] APPLICATIONS

The ability to predict the full spectrum diffusion bandwidth and crossover frequency, as well as the unlimited selection of aesthetic design approaches makes the DIFFRACTAL™ a very attractive design ingredient.The RPG 1-D DIFFRACTAL™ has been applied in two state-of-the-art recording studio installations at Peter Gabriel's Real World Studios, Bath, England (Fig. 25) and Rhinoceros Recording, Sydney, Australia (Fig. 26). In both facilities the DIFFRACTAL™ was designed for the acoustical consultancy firm of Harris-Grant Associates, Wembley, UK. The acoustical and aesthetic goals were met in both facilities. At the present time many additional DIFFRACTALS™ have been designed in collaboration with the Russ Berger Design Group, Dallas; John Storyk Associates, NY; Martin Pilchner Associates, Toronto; Shen, Milson, Wilke, NY; Guillermo Acosta, AMCO, Mexico; and Harris-Grant Associates, Europe for installations in the U.S, Canada, Jamaica, Mexico and Europe.

The 1-D and 2-D DIFFRACTAL™ represent a new design ingredient to control low frequencies in rooms, with simultaneous mid-high frequency diffusion. The 2-D DIFFRACTAL™ offers additional low frequency control due to its $1/N^2$ attenuation and omnidirectional coverage. These properties can be exploited in recording control rooms. The first application of the 2-D DIFFRACTAL™ is at Crawford Post Production, Atlanta, GA in collaboration with John Storyk Associates. The DIFFRACTAL™ covers the entire rear wall and consists of two sections. The lower section is a full spectrum 1-D DIFFRACTAL™ and the upper section is a pseudo 2-D DIFFRACTAL™ wherein the HFD within the LFD™ cells of the 2-D OMNIFFUSOR™ are oriented 1-D QRD® DIFFUSORS. A schematic representation is shown in Fig. 27.

ANEXO B

FICHA TECNICA - POLIESTIRENO EXPANDIDO.

Definición

El Poliestireno Expandido (EPS) es una espuma rígida de color blanco de gran trabajabilidad, caracterizada por un termoplástico celular de baja densidad y alta resistencia físico-mecánica en relación a su reducido peso aparente.

Está constituido por un sin número de celdas cerradas, solidariamente apoyadas y termo-soldadas tangencialmente entre sí, las cuales contienen aire quieto ocluido en su interior. El 98% del aire quieto en su volumen es lo que le confiere una extraordinaria capacidad de aislamiento térmico.

Aplicaciones

Código Actividad	Descripción de Actividad
2.2.1.1	TERMINACIONES - AISLACIÓN TERMO-ACÚSTICO - En complejo de techumbres.
2.2.1.2	TERMINACIONES - AISLACIÓN TERMO-ACÚSTICO - En muros perimetrales.
2.2.1.3	TERMINACIONES - AISLACIÓN TERMO-ACÚSTICO -De recintos especiales.
3.4.1.1	INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN ARTIFICIAL - INSTALACIONES DE CALEFACCIÓN - Sistema de losa radiante.

El Poliestireno Expandido es un material versátil que posee una diversidad de aplicaciones, dentro de éstas se puede destacar:

- Aislamiento térmico de elementos constructivos (exterior e interior de la envolvente en la edificación).

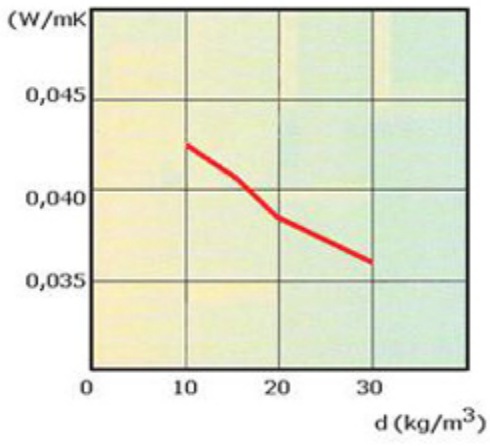
- Aislación para losas radiantes de entrepisos de edificios.
- Hormigones y rellenos livianos para sobrelosas.
- Aislación acústica de ruidos de impacto en estructuras de entrepiso (pisos flotantes sobre EPS elastificado).
- Absorción de vibraciones producidas por el transporte, ferrocarril, urbano y afines. Paneles prefabricados diversos para uso en viviendas y en la industria frigorífica.
- Piezas y moldes para materializar forma y complementar la función de moldajes o encofrados.
- Complemento de materiales para alivianar estructuras, como por ejemplo: bovedillas, encofrados perdidos y otros. Para conformar elementos decorativos. En aplicaciones geotécnicas como:
- La protección de carretera frente a las heladas.
- Conformación de terraplenes livianos para la reducción de asentamientos y tensiones de empujes en los estribos de puentes, viaductos y obras afines.
- Ampliaciones de obras civiles. Revestimiento de vertederos.

Características cuantitativas y/o cualitativas

a. Conductividad Térmica: transporte del calor

La Conductividad Térmica es la Función de la Densidad (*)

λ (W/(mK)	d (kg/m³)
0,0425	10
0,0413	15
0,0384	20
0,0373	25
0,0361	30



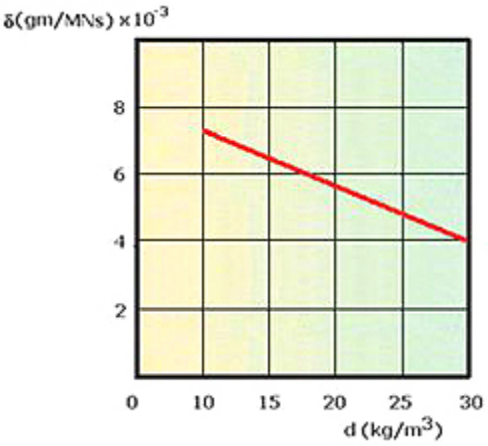
(*) De acuerdo a la NCh 853, d = densidad aparente

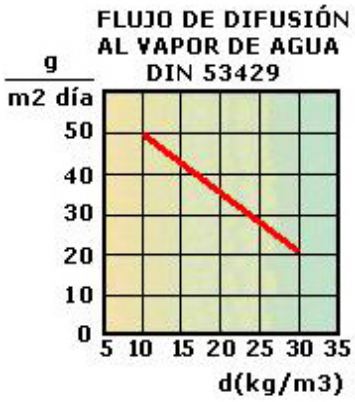
* Nota: La densidad mínima de fabricación del Poliestireno Expandido es 10 kg/m³.

b. Permeabilidad al Vapor de Agua: transporte de vapor

Permeabilidad o Difusividad δv al Vapor de Agua en Función de la Densidad

δv(gm/MNs x 10^{-3})	d (kg/m^3)
7,2	10
6,2	15
5,8	20
4,8	25
4,0	30

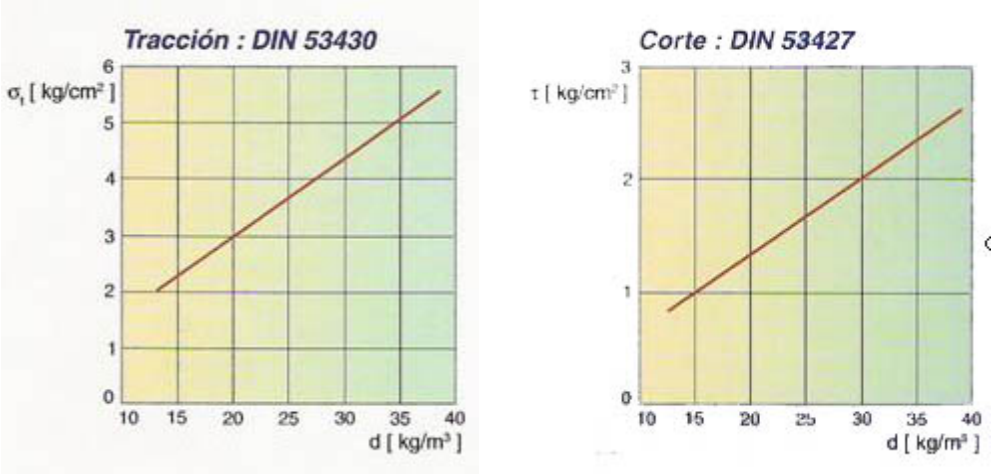








c. Resistencia Mecánica: tensiones en función de la densidad



Normas y estándares de Calidad que satisface

Densidades de fabricación del Poliestireno expandido

Los productos de Poliestireno expandido se fabrican en diferentes densidades, donde la densidad es una de las variables que tiene relación directa sobre la capacidad aislante y las propiedades físico-mecánicas de los mismos.

Ventajas del producto

Medio Ambiente

- Material inerte, inocuo y compatible con el medio ambiente.
- Producto reciclable - no produce clorofluorcarbonos - no daña la capa de ozono.

Impermeabilidad

- Mantiene su capacidad de aislamiento térmico en el tiempo.
- No absorbe agua. No necesita de un revestimiento adicional contra la absorción de humedad.
- No altera su conductividad térmica.

Comportamiento Frente al Fuego

- Posee una carga combustible despreciable.

- Es autoextinguible (no propaga llama), contiene ignífugo.
- Cumple resistencia al fuego por certificación de IDIEM.

Dimensionamiento

- Espesores y medidas según requerimientos del usuario.
- Densidad y calidad garantizadas por certificación.

Estabilidad Dimensional

- Indeformable.

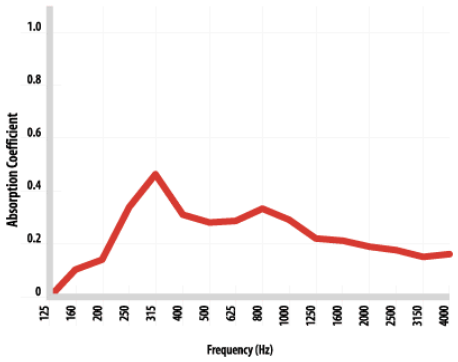
Recomendaciones generales

Aspectos de importancia a considerar en los materiales aislantes térmicos

- Certificación del producto considerado.
- Estructura del aislante térmico a utilizar: El Poliestireno Expandido está configurado por una estructura de celdas cerradas, lo que le posibilita contener aire quieto en su volumen al interior de ellas, confiriéndole una extraordinaria capacidad de aislamiento térmico.
- Baja conductividad térmica.
- Estabilidad de la conductividad térmica (aumenta si el material absorbe humedad).
- Densidad del material (conductividad térmica asociada).
- Estabilidad dimensional.
- Resistencia físico – mecánica.

- Flexibilidad de dimensionamiento y trabajabilidad. Amigable e inócuo con la naturaleza y el medio ambiente.

Coeficiente de absorcion Sonora.



ANEXO C.

INFORME DE MEDICIÓN DE DIFUSOR.

Criterios de espacio.

Para medir en campo lejano cumplimos con los siguientes criterios.

- La dimensión del difusor es de 0.58 m.
- La longitud de onda de la menor frecuencia del difusor es de 0.68m correspondiente a 500Hz

Siguiendo los siguientes criterios.

r ›› Dmax

r/Dmax ›› Dmax/λ

r = 2r1r2 / (r1+r2)

Donde:

Dmax es la máxima dimensión del difusor.

λ Longitud de onda

r1 Distancia de la fuente al punto de referencia.

r2 Distancia del receptor al punto de referencia.

Para cumplir con estos criterios se escogió r1 = 5m y r2 = 2.5m.

Fuente:

La fuente elegida fue una cabina JBL- EON 10-G2 a continuación se presentan las especificaciones de la cabina.

Freq. Range (-10 dB): 65 Hz - 18 kHz

Freq. Response (±3 dB): 90 Hz - 16 kHz

Horz. Coverage (-6 dB): 90° Nominal

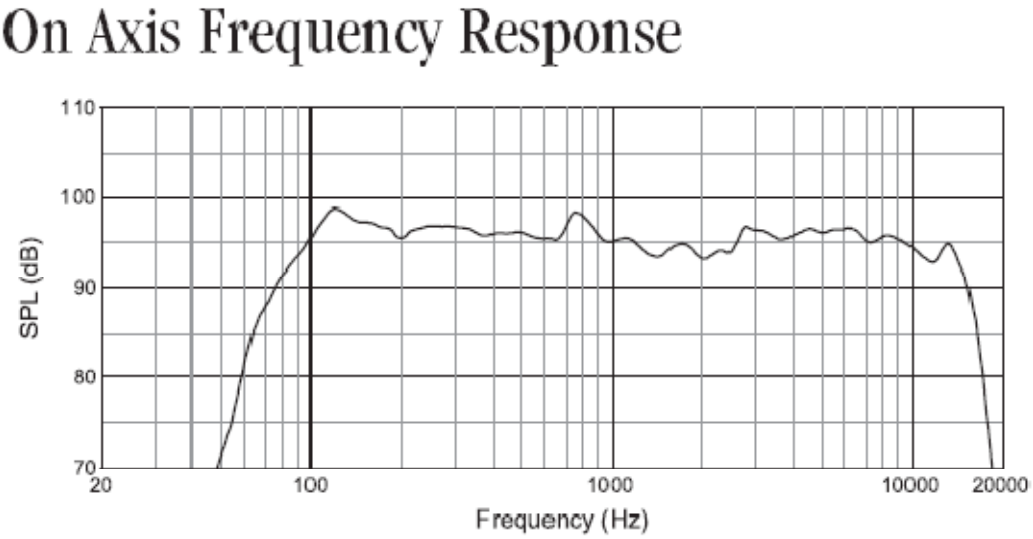
Vert. Coverage (-6 dB): 60° Nominal

Rated Maximum SPL: 117 dB, @ 1 m (3.3 ft)

Dimensions (H x W x D): 493 mm x 356 mm x 307 mm

(19.4 in x 14.0 in x 12.1 in.)

Net Weight: 10.4 kg (23 lb)



Receptor:

Se utilizó como receptor un micrófono de medición Behringer ECM-8000.

Especificaciones:

- Respuesta de frecuencia sumamente lineal desde 15 Hz a 20 kHz.
- Tecnología de condensador de electreto.
- Característica omnidireccional real y equilibrada.
- Muy adecuado para aplicaciones de medición acústica.
- Alimentación fantasma de +15 V a +48 V.
- Se entrega en una caja resistente con clip de micrófono y adaptador para pie de micro.

Método:

El método de medición utilizado fue el de respuesta al impulso, generando un LSS (lineal sine sweep) de 15 seg de duración. Se grabo la señal para cada punto de medición y luego se encontró la respuesta al impulso a través de la deconvolucion de la señal de entrada con la de salida.

Medición:

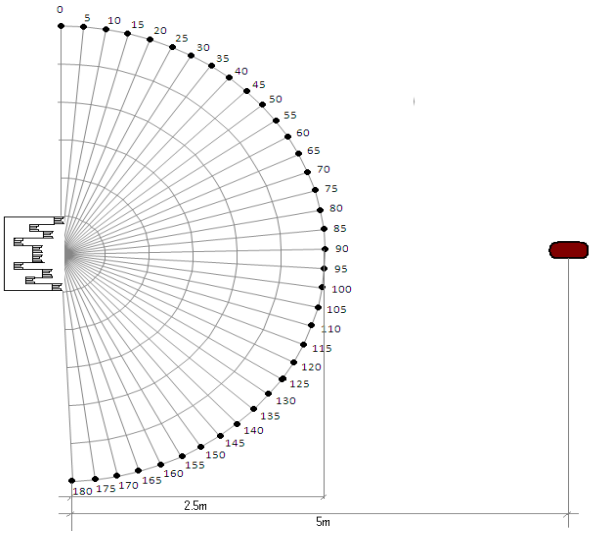
La medición se realizo el 10 11 y 12 de de junio del 2008, a las 9:00 am, con una temperatura de 21 Grados Celsius, en las instalaciones de la cancha de tenis de la Universidad San Buenaventura, al aire libre.

Las distancias y posicionamiento de fuente y receptor, se establecieron dentro de los parámetros del documento de recomendación de la AES. Midiendo el difusor con puntos de receptores posicionados en media circunferencia angulados cada 5 grados, realizando cada medición para cada dimensión y posiciones de fuente a 0 (incidencia normal) y 55 grados (incidencia aleatoria). La instrumentación utilizada para esta medición fue la siguiente.

- Micrófono de medición ECM-8000.
- Consola Behringer euro rack 6 canales.
- Interface de audio digidesing Mbox 1.
- Computador portátil.
- Cabina JBL –EON 10 - G2.

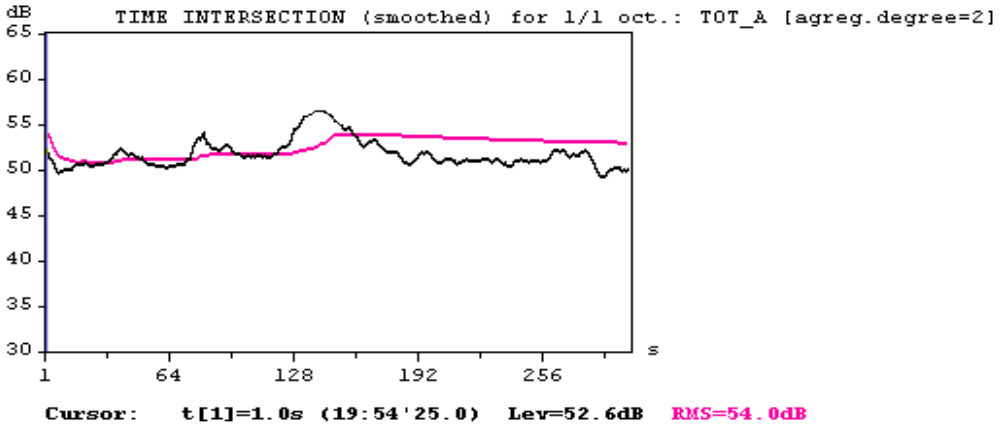
El programa que se usó para las grabaciones de los impulsos fue adobe adution. La señal que se generó fue un LSS (lineal sine sweep) durante 14 seg. Se grabó la señal de salida durante 15 seg para cada punto de receptor y posición de fuente. De lo anterior se obtuvieron 185 grabaciones correspondientes a las siguientes configuraciones.

- 37 grabaciones para la dimensión 1 con fuente a 0 grados de incidencia.
- 37 grabaciones para la dimensión 2 con fuente a o grados de incidencia.
- 37 grabaciones para la dimensión 1 con fuente a 55 grados de incidencia.
- 37 grabaciones para la dimensión 2 con fuente a 55 grados de incidencia.
- 37 grabaciones para superficie del mismo material y dimensiones a 0 grados de incidencia de la fuente.



Una vez se obtuvo las respuestas al impulso se establecieron niveles en tercio de octava de cada medición para el sonido directo y reflejado usando una FFT (Fast fourier transform).

La fuente Fue calibrada a 102 dB a 1kHz, ya que la norma pide como mínimo 40dB por encima del ruido de fondo, el ruido de fondo se midió durante 5 min obteniendo el siguiente nivel continuo equivalente Leq.



Errores sistemáticos.

Debido a la instrumentación usada podemos destacar algunos errores sistemáticos que pudieron afectar la medición.

- La respuesta en frecuencia de la cabina, ya que no es lineal y tiene una caída de 16kHz a 20kHz podiendo afectar directamente el coeficiente de difusión en estas frecuencias.
- EL ambiente de medición ya que se realizo al aire libre afectado directamente por el ruido de fondo.